



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

農學博士學位論文

과열증기를 이용한 목재 건조-열처리
복합 공정 최적화에 관한 연구

Optimization of the Combined Drying and Heat-treatment Process
for Wood using Superheated Steam

2018년 2월

서울대학교 대학원
산림과학부 환경재료과학 전공
박 용 건

農學博士學位論文

과열증기를 이용한 목재 건조-열처리
복합 공정 최적화에 관한 연구

Optimization of the Combined Drying and Heat-treatment Process
for Wood using Superheated Steam

지도교수 : 여 환 명

박 용 건

서울대학교 대학원
산림과학부 환경재료과학 전공
2018년 2월

과열증기를 이용한 목재 건조-열처리
복합 공정 최적화에 관한 연구

Optimization of the Combined Drying and Heat-treatment Process
for Wood using Superheated Steam

지도교수 : 여 환 명

이 논문을 농학박사학위 논문으로 제출함

2017년 11월

서울대학교 대학원

산림과학부 환경재료과학 전공

박 용 건

박용건의 박사학위 논문을 인준함

2018년 1월

위 원 장 오 정 권 (인)

부위원장 여 환 명 (인)

위 원 김 남 훈 (인)

위 원 이 원 희 (인)

위 원 이 형 우 (인)

초 록

과열증기를 이용한 목재 건조-열처리 복합 공정 최적화에 관한 연구

Optimization of the Combined Drying and Heat-treatment Process
for Wood using Superheated Steam

서울대학교 대학원
산림과학부 환경재료과학전공
박용건

목재 열처리는 목재에 160~260℃ 정도의 열을 가하여 목재 주성분을 변화시킴으로써 목재의 물리·역학적 성능과 내부후성능을 개선하는 방법이다. 열처리에 의해 목재는 소수성이 증가하고, 이에 따라 치수안정성이 개선되며, 표면 재색이 어두워짐에 따라 불균일한 표면 재색이 균일해진다. 또한 화학적인 약제 주입 없이 친환경적인 방법으로 목재의 균에 대한 저항성을 증가시킬 수 있다. 이러한 장점들로 인해 2000년대 초반부터 유럽을 중심으로 다양한 목재 열처리 방법이 개발되어 왔고, 각 처리 방법에 따른 여러 수종의 물성평가가 이루어져왔다.

현재까지 개발된 열처리 방법 중 대부분은 열처리 중 목재에 할열이 발생하는 것을 최소화하기 위해 건조된 목재를 이용하고 있다. 하지만 건조와 열처리가 별개의 장치에서 서로 다른 공정으로 이루어짐에 따라 목재와 장치를 가열하는 시간과 에너지가 추가로 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 건조되지 않은 낙엽송 생재를 할렬 없이 열처리하기 위해 과열증기를 도입하였다. 과열증기는 끓는점 이상의 온도를 갖는 증기로서 목재뿐만 아니라 식품이나 하수 슬러지 등의 건조에 이용되고 있는 건조 매개체이다. 다양한 온도와 압력 조건의 과열증기에서 낙엽송 생재 판재를 건조-열처리하여 할렬이 발생하지 않는 적정 조건을 결정하였다. 또한 과열증기 건조-열처리 공정을 위해 투입해야 할 물의 양, 건조-열처리 후 가열된 목재를 냉각시키는 방법 등 과열증기 건조-열처리 공정의 제어 인자들을 결정하였다.

다른 목재 열처리 방법과 비교하여 과열증기 건조-열처리 방법은 에너지 효율이 높다. 이를 정량적으로 비교하기 위하여 열기 건조 후 고온 열기 열처리하는 관행 열처리 공정과 실제 사용된 전력량 및 에너지 효율을 비교/평가하였다. 목재를 열처리하는 데 필요한 이론적 소요 열에너지를 목재를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_1), 흡습력 극복을 위한 열에너지(H_2), 목재 내 잔존 수분의 가열을 위한 열에너지(H_3), 목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지(H_4), 목표 조건의 과열증기 생성을 위한 열에너지(H_{5ss}), 반응기 내 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_{5ha}) 및 반응기 외부에서 유입되는 건조 공기(H_{6da})와 수증기(H_{6wv})를 가열하는 데 필요한 열에너지로 구분하여 각각의 목재 열처리 방법으로 목재를 열처리하는 데 필요한 이론적 소요 열에너지의 총합(H)을 평가하였다. 이 값과 실제 목재를 건조하고 열처리하는데 사용된 전력량(P)의 차이를 통해 에너지 손실량을 결정하였다. 그 결과 과열증기 건조-열처리 공정은 관행 열처리 공정보다 약 94,000 kJ만큼의 에너지를 적게 사용했고, 에너지 효율은 각각 79.95%와 48.66%로 측정되어 약 2배 정도 높은 에너지 효율을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재의 화학적 주성분(셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌 및 추출물)의 상대적 함량비를 측정하였다. 과

열증기 건조-열처리에 의해 낙엽송 내 헤미셀룰로오스 구성 당(xylan, mannan, galactan, arabinan)의 함량비가 크게 감소하였고, Klason 리그닌의 함량비가 크게 증가하였다. 하지만 이는 고온의 열처리에 의해 목재 내에 리그닌의 절대량이 증가한 것이 아니라 헤미셀룰로오스로부터 분해된 furan계 화합물이 리그닌과 결합하여 거대 리그닌 고분자화되어 Klason 리그닌법에 의해 측정된 Klason 리그닌의 함량비가 증가한 것으로 생각된다. 과열증기-건조 열처리 공정의 경우에는 고온의 열처리에 의해 목재로부터 분해된 다양한 화합물이 응축기를 통해 회수된다. 응축기에서 회수된 화합물에는 furfural, acetic acid, formic acid, 5-hydroxymethylfurfural, levulinic acid 등 다양한 헤미셀룰로오스 유래 분해산물이 포함되어 있고, glucan, xylan, mannan, galactan, arabinan 등의 당 성분 또한 포함되어 있어 고온의 열처리에 의해 헤미셀룰로오스가 분해되었음을 확인할 수 있었다.

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송의 세포벽 구조 변화를 광학 현미경, 주사 전자 현미경 및 투과 전자 현미경을 통해 확인하였다. 과열증기 건조-열처리에 의해 횡단면에서 방사조직을 따라 할렬이 발생했음을 광학 현미경을 통해 확인할 수 있었다. 주사 전자 현미경을 통한 관찰 결과, 횡단면에서 과열증기 건조-열처리재의 이차벽 내 S2층이 무처리재보다 거칠게 절단된 것을 확인할 수 있었고, 이는 접선단면에서 방사조직 절단면에서도 관찰되었다. 또한 횡단면에서 세포벽을 구성하는 각 층 사이의 경계면이 벌어진 것을 확인할 수 있었다. 방사단면에서는 건조-열처리에 의해 폐쇄된 벽공과 벽공 내부 압력 상승으로 인해 벽공을 막고 있는 토러스가 갈라진 것을 확인할 수 있었다. 투과 전자 현미경을 통해 관찰한 결과에서는 과열증기 건조-열처리에 의해 중간층-일차벽-이차벽 사이의 경계면이 휘어지거나 끊어지는 등의 불연속 구간을 확인할 수 있었고, 이차벽 내 S3층에서 고온의 열처리에 의한 손상이 있었음을 확인할 수 있었다.

이러한 연구결과를 바탕으로 낙엽송 정각재를 할렬 발생 없이 건조하기 위해 과열증기 건조-열처리 전에 고온의 포화증기를 이용하여 각재 내 수분 경사를 작게 유지하면서 예비 건조시킨 다음 과열증기를 이용하는 연속 건조 공정을 적용하였다. 또한 할렬 발생이 없는 건조 스케줄 개발을 위해 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 각재 내부에서 발생하는 건조 응력을 정량적으로 측정하였다. 포화증기 건조가 진행되는 동안 각재 표면과 내부층의 함수율 차이가 발생하였지만 표면 할렬은 발생하지 않았다. 이때, 표면층에서는 인장 응력이, 내부층과 중심층에서는 압축 응력이 작용하였다. 과열증기 건조 초기에 각재 내부층과 중심층의 함수율 차이가 발생하면서 내부 할렬이 발생하였다. 이때, 내부층이 인장 응력 상태에 놓였으며, 표면층과 중심층은 압축 응력을 받았다. 과열증기 건조 말기에는 모든 층에서 거의 전건 상태가 되었으며, 중심층만 인장 응력을 받았고, 표면층과 내부층은 압축 응력을 받았다. 포화-과열증기 건조 공정이 진행되는 동안 각재 표면층의 최대 인장 응력은 1.30 MPa이었고, 같은 조건에서 낙엽송의 접선방향 인장 강도는 5.21 MPa이었다. 건조 공정이 진행되는 동안 표면층의 최대 인장 응력이 접선 방향 인장 강도를 초과하지 않았기 때문에 각재에서 표면 할렬이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 내부 할렬은 44~54시간을 전후하여 발생한 것으로 생각되며, 과열증기의 온도와 압력 및 건조 시간을 조절하고 적절히 통제하여 내부 할렬 발생을 방지하기 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

주요어 : 과열증기 건조-열처리, 에너지 효율, 화학 성분, 세포벽 구조, 건조 응력

학 번 : 2012-30993

목 차

제 1 장

서 론	1
1. 연구 배경	2
2. 연구 목표	7
3. 연구사	8
3.1. 목재 열처리에 관한 연구	8
3.2. 열처리에 의한 목재 세포벽 주성분의 화학적 변화에 관한 연구	12
3.3. 열처리에 의한 목재 세포벽 구조 변화에 관한 연구	18
3.4. 열처리 중 목재 내에서 발생하는 응력에 관한 연구	21
3.5. 목재의 점탄성 모형과 유변학적 거동에 관한 연구	24

제 2 장

과열증기를 이용한 낙엽송 판재 건조-열처리 공정 제어 조건 결정	37
1. 서 론	38
2. 재료 및 방법	40
2.1. 공시 수종	40
2.2. 과열증기 목재 열처리 장치	43
2.2.1. 반응기 (Reactor)	44
2.2.2. 응축기 (Condenser)	45
2.2.3. 증류수 피드탱크 (Water feed-tank)	45
2.2.4. 진공펌프 (Vacuum pump)	45
2.2.5. 원격 제어 시스템	46
2.3. 낙엽송 판재 무할렬 건조 열처리를 위한 과열증기 조건 결정	48
3. 결과 및 고찰	49
3.1. 온도 변화에 따른 건조 결함 평가	49
3.2. 압력 변화에 따른 건조 결함 평가	55
3.3. 처리 시간 변화에 따른 건조 결함 평가	57
3.4. 냉각 속도(온도)에 따른 건조 결함 평가	59
4. 결 론	60

제 3 장

과열증기를 이용한 낙엽송 판재 건조-열처리 공정의 에너지 효율 평가

.....	61
1. 서 론	62
2. 재료 및 방법	63
2.1. 과열증기 건조-열처리	63
2.2. 열기 건조 후 열기 열처리	64
2.2.1. 열기 건조	64
2.2.2. 열기 열처리	65
2.3. 이론적 소요 열에너지의 구분	66
2.3.1. 목재의 온도 상승을 위한 열에너지	67
2.3.2. 흡습력 극복을 위한 열에너지	67
2.3.3. 목재 내 잔존 수분의 가열을 위한 열에너지	67
2.3.4. 목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지	68
2.3.5. 목표 조건의 과열증기를 생성하기 위한 열에너지	68
2.3.6. 반응기 내 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지	69
2.3.7. 반응기 외부에서 유입되는 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지	69
2.3.8. 이론적 소요 열에너지의 총합	70
2.4. 에너지 손실 및 에너지 효율	71

3. 결과 및 고찰	73
3.1. 이론적 소요 열에너지	73
3.1.1. 목재의 온도 상승을 위한 열에너지	74
3.1.2. 흡습력 극복을 위한 열에너지	74
3.1.3. 목재 내 잔존 수분의 가열을 위한 열에너지	74
3.1.4. 목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지	75
3.1.5. 목표 조건의 과열증기를 생성하기 위한 열에너지	75
3.1.6. 반응기 내 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지	76
3.1.7. 반응기 외부에서 유입되는 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지	77
3.1.8. 이론적 소요 열에너지의 총합	77
3.2. 에너지 손실 및 에너지 효율	78
4. 결 론	81

제 4 장

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송재의 화학적 주성분 변화 분석

.....	82
1. 서 론	83
2. 재료 및 방법	84
2.1. 과열증기 건조-열처리	84
2.2. 열기 건조 후 열기 열처리	86
2.3. 화학적 주성분 함량 측정	87
2.4. 과열증기 건조-열처리에 의해 발생한 응축액 성분 분석	89
3. 결과 및 고찰	90
3.1. 낙엽송 판재의 화학적 주성분 분석 결과	90
3.2. 과열증기 건조-열처리에 의해 발생한 응축액 성분 분석	95
3.3. 낙엽송 판재의 화학적 주성분 분석 결과 mass balance	98
4. 결 론	103

제 5 장

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송재의 세포벽 구조 변화 분석

.....	104
1. 서 론	105
2. 재료 및 방법	107
2.1. 과열증기 건조-열처리	107
2.2. 세포벽 구조 분석을 위한 시편 준비	109
2.2.1. 광학 현미경	109
2.2.2. 주사 전자 현미경	110
2.2.3. 투과 전자 현미경	111
3. 결과 및 고찰	113
3.1. 광학 현미경 관찰 결과	113
3.2. 주사 전자 현미경 관찰 결과	117
3.3. 투과 전자 현미경 관찰 결과	127
4. 결 론	133

제 6 장

포화-과열증기를 이용한 낙엽송 정각재 연속 건조 공정 중 목재

내 건조 응력 분석	134
1. 서 론	135
2. 재료 및 방법	137
2.1. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조	137
2.2. 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 내부 함수율 분포 변화 및 유변학적 거동 변화 분석	139
2.3. 자유 수축률 결정	141
2.4. 슬라이스 시편 변형량의 구분 및 건조 응력 산출	142
2.5. 낙엽송재의 접선 방향 인장 강도 및 인장 탄성 계수 측정	147
3. 결과 및 고찰	150
3.1. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조	150
3.2. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 내부 함수율 분포 변화 및 유변학적 거동 변화 분석	152
3.2.1. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 함수율 변화	152
3.2.2. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 각재 내부 함수율 분포 변화	153

3.2.3. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 내부	
할렬 발생 유무 평가	155
3.2.4. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 함수율	
변화	157
3.2.5. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 자유	
수축률 및 수분 감소에 따른 실제 수축률 변화	158
3.2.6. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 탄성	
변형률 변화	162
3.2.7. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 점탄성	
변형률 변화	164
3.2.8. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 점성	
변형률 변화	166
3.3. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 건조	
응력 산출	168
4. 결 론	170
참고문헌	171

표 목 차

Table I – 1. Comparison among the five wood heat treatment processes	4
Table III – 1. FPL kiln drying schedule for larch lumber with 50 mm thickness (T10–C4S)	64
Table III – 2. Values measured during the drying and the heat treatment for evaluation of the required heat energy and energy efficiency for the drying and heat treatments	80
Table IV – 1. Relative percentage contents of the major chemical components in larch lumber before and after both heat treatment methods	91
Table IV – 2. Chemical name and content in gas condensate by HPLC analysis	97
Table IV – 3. Chemical name and content in liquid condensate by HPLC analysis	97
Table IV – 4. Mass balance of major chemical component of larch lumber before and after heat treatment ...	100

Table VI- 1. Total free shrinkage from green to oven-dry at each layer	141
Table VI- 2. Difference between free shrinkage and actual shrinkage	161

그림 목 차

Figure I – 1. Phase equilibrium curve of the water	5
Figure I – 2. Three steps of thermowood method	9
Figure I – 3. Structure of cellulose showing the repeating cellobiose unit	12
Figure I – 4. Abbreviated formulas for galactoglucomannan from softwood	13
Figure I – 5. Abbreviated formulas for glucuronoxylan from hardwood	13
Figure I – 6. Main building units of lignin in wood	14
Figure I – 7. Chemical changes occurring in the main component of wood due to heat treatment	17
Figure I – 8. Schematic of cell wall layers within cellular structure of wood	18
Figure I – 9. Cell wall models of Norway spruce tracheids	19
Figure I – 10. Strain distribution in 50 mm oak (<i>Quercus rubra</i>) during air drying	22
Figure I – 11. Tensile test for cylindrical polymeric material	25
Figure I – 12. Stress response by sinusoidal strain	29

Figure I –13. Deformation due to constant load and after unloading	30
Figure I –14. Creep due to constant uniaxial stress and phases of creep	31
Figure I –15. Hookean and Newton element	32
Figure I –16. Mechanical models of wood creep	33
Figure I –17. Schematic representation of the rheological model during wood drying	34
Figure I –18. Classification of deformation and dimensional changes of slice during the drying process	36
Figure II – 1. Species distribution in Korea	40
Figure II – 2. Microscopic image of Japanese larch	41
Figure II – 3. Larch lumber specimen for drying and heat treatment using superheated steam	42
Figure II – 4. Wood heat treatment equipment using superheated steam	43
Figure II – 5. CIMON-X program installed on the computer connected with wood heat treatment equipment using superheated steam	47

Figure II – 6. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 24 hours	50
Figure II – 7. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 24 hours	50
Figure II – 8. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 18 hours	52
Figure II – 9. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 18 hours	52
Figure II –10. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 18 hours	54
Figure II –11. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 18 hours	54

Figure II –12. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.7 MPa and 250°C for 18 hours	56
Figure II –13. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.7 MPa and 250°C for 18 hours	56
Figure II –14. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 12 hours	58
Figure II –15. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 12 hours	58
Figure II –16. Check occurrence on the surface of larch lumber cooled at room temperature	59
Figure III – 1. Changes of air temperature, wood temperature, and air pressure during hot–air heat treatment at 0.1 MPa and 250°C for 18 hours	65

Figure IV– 1. Preparation of the larch lumber for the drying and heat treatment using superheated steam and the analysis of major chemical components in wood	85
Figure IV– 2. Procedures for determining major components in wood	88
Figure IV– 3. Pyrolysis GC/MS chromatographs for the Klason lignin	94
Figure IV– 4. Gas condensate collected in the condenser during the drying and heat treatment using superheated steam	96
Figure IV– 5. Liquid condensate collected in the condenser during the drying and heat treatment using superheated steam	96
Figure IV– 6. Relative percentage content changes of major chemical components in larch lumber before and after drying and heat treatment using superheated steam	101
Figure IV– 7. Relative percentage content changes of major chemical components in larch lumber before and after hot–air heat treatment	102

Figure V – 1. Preparation of the larch lumber for the drying and heat treatment using superheated steam	108
Figure V – 2. Optical microscope	109
Figure V – 3. Field-emission scanning electron microscope (FE-SEM)	110
Figure V – 4. Transmission electron microscope (TEM)	112
Figure V – 5. Optical microscope image (cross section of non-treated larch wood, $\times 40$)	114
Figure V – 6. Optical microscope image (cross section of dried and heat-treated larch wood, $\times 40$)	114
Figure V – 7. Optical microscope image (radial section of non-treated larch wood, $\times 100$)	115
Figure V – 8. Optical microscope image (radial section of dried and heat-treated larch wood, $\times 100$)	115
Figure V – 9. Optical microscope image (tangential section of non-treated larch wood, $\times 100$)	116
Figure V – 10. Optical microscope image (tangential section of dried and heat-treated larch wood, $\times 100$)	116
Figure V – 11. Field-emission scanning electron microscope image (cross section of non-treated larch wood, $\times 2,000$)	119

Figure V-12. Field-emission scanning electron microscope image (cross section of dried and heat-treated larch wood, $\times 2,000$)	120
Figure V-13. Field-emission scanning electron microscope image (radial section of non-treated larch wood, $\times 5,000$)	121
Figure V-14. Field-emission scanning electron microscope image (radial section of dried and heat-treated larch wood, $\times 5,000$)	122
Figure V-15. Field-emission scanning electron microscope image (tangential section of non-treated larch wood, $\times 5,000$)	123
Figure V-16. Field-emission scanning electron microscope image (tangential section of non-treated larch wood, $\times 5,000$)	124
Figure V-17. Field-emission scanning electron microscope image (tangential section of dried and heat-treated larch wood, $\times 5,000$)	125
Figure V-18. Field-emission scanning electron microscope image (tangential section of dried and heat-treated larch wood, $\times 5,000$)	126

Figure V-19. Transmission electron microscope image (cross section of non-treated larch wood, $\times 25,000$)	128
Figure V-20. Transmission electron microscope image (cross section of non-treated larch wood, $\times 30,000$)	129
Figure V-21. Transmission electron microscope image (cross section of larch wood dried and heat-treated using superheated steam, $\times 20,000$)	130
Figure V-22. Transmission electron microscope image (cross section of larch wood dried and heat-treated using superheated steam, $\times 30,000$)	131
Figure V-23. Transmission electron microscope image (cross section of larch wood dried and heat-treated using superheated steam, $\times 60,000$)	132
Figure VI- 1. Phase change of water with temperature change	135
Figure VI- 2. Equilibrium moisture content of wood versus humidity and temperature according to the Hailwood-Horrobin equation	136

Figure VI– 3. Preparation of the timber specimen for the continuous drying process using saturated and superheated steam	137
Figure VI– 4. Preparation of the specimens to measure internal moisture content distribution and to analyze drying stress in the square timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam	140
Figure VI– 5. Dimensional changes of slice during the drying process	143
Figure VI– 6. Digital camera stand for measuring length of the slice	144
Figure VI– 7. Specimens for measuring tensile strength of larch wood in tangential direction	147
Figure VI– 8. Load–deformation diagram of tensile test	149
Figure VI– 9. Changes of steam temperature, timber temperature, and steam pressure during the continuous drying process using saturated and superheated steam	151

Figure VI-10. Average moisture content changes of the timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam	152
Figure VI-11. Moisture content distribution changes along to the transverse direction in the timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam	154
Figure VI-12. Cross section images at center of timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam	156
Figure VI-13. Cross section images at center of timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam	157
Figure VI-14. Free shrinkage changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam	160
Figure VI-15. Actual shrinkage changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam	160

Figure VI-16. Elastic strain changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam	163
Figure VI-17. Visco-elastic strain changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam	165
Figure VI-18. Viscous strain changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam	167

제 1 장

서 론

1. 연구 배경

목재는 인류가 지구상에 출현한 이래 인류의 생존과 문명 발전에 크게 기여해왔다. 목재는 원시인들의 간단한 생활용구로부터 시작해 공학 목재에 이르기까지 다양하게 발전하였다. 목재와 목재제품은 현재 일부 용도에서 금속, 플라스틱 등 인조재료와 경쟁관계에 있지만 원료 또는 재료로서 다양한 분야에서 널리 이용되고 있다. 특히, 최근 탄소배출권과 친환경(eco-friendly)에 대한 전 세계적인 관심이 증대되면서 콘크리트나 금속 또는 석유로부터 유래되는 플라스틱 등 탄소 배출량이 많고, 자연에서 분해되지 않는 재료의 대체재로서 환경 친화적인 재료인 목재를 이용하고자 하는 인식이 증가하는 추세이다.

목재는 다양한 재색, 조직과 문양을 갖고 있으며 다른 재료에서는 기대할 수 없는 촉감을 지니고 있고, 시각에서 따스한 느낌을 주는 등 사람의 생체리듬과 부합되는 재료이다. 또한 목재는 가벼우면서도 강도와 강성이 크고, 열과 전기에 대한 절연성이 크며, 주위 온도 변화에 따른 열에 의한 냉온의 변화가 둔하고, 수축과 팽창이 적은 물리적 성질을 갖는다. 또한 목재는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스와 리그닌과 같은 주 성분과 다양한 부성분으로 구성되어 있어 이들 성분은 각종 화학제품과 약용의 원료로 쓰인다.

목재는 다른 자원과 달리 광합성에 의해 생성되며 재생 가능한 무한 자원으로 미생물에 의해 분해된다는 장점이 있지만, 목재의 이용이라는 측면에서 미생물에 의한 분해는 재료 성능의 감소로 이어지는 단점으로 작용할 수 있다. 또한, 다공성·흡습성 재료인 목재는 흡습과 탈습에 따라 수축하거나 팽윤하는 성질이 있고, 직교 이방성을 갖기 때문에 성질의 변이성을 갖는 등의 단점도 있어 이러한 단점을 효과적으로 극복하기 위한 여러 가지 방법이 개발되어 왔다.

이 중, 목재의 열처리는 목재에 160~260℃ 정도의 열을 가하여 목재 주성분을 변화시킴으로써 목재의 물리·역학적 성능과 내부후 성능을 영구적으로 개선하는 방법이다(Militz, 2002). 열처리에 의해 목재는 소수성이 증가하여 치수안정성이 커지고, 불균일한 표면 재색을 균일하게 하며 내부후성이 향상되는 등의 장점을 갖기 때문에 2000년대 초반부터 유럽을 중심으로 목재의 친환경 방부·방충 방법으로 열처리가 많이 이용되고 있다. 현재 알려져 있는 열처리 방법은 독일의 OHT법(Oil Heat Treatment), 핀란드의 Thermowood법, 프랑스의 Bois Perdure법과 Rectification Process 그리고 네덜란드의 Plato Process 등이 있다(Table I-1). 이 방법은 Hot oil, Steam, N₂ 또는 Hot air 등의 열전달 매개체를 이용하여 목재를 가열하는 방법으로 증기를 이용한 열처리 방법을 제외한 모든 방법은 수분 감소에 따른 목재의 결함을 방지하기 위해 건조된 목재를 사용한다. 건조된 목재를 열처리하면 수분 감소에 따른 결함을 예방할 수 있지만 건조와 열처리 각각의 공정에 시간과 목재 가열 에너지가 사용되기 때문에 경제적 비용이 크게 발생한다는 단점이 있다. 반면에 증기를 이용하는 열처리 방법은 생재 목재를 건조 공정을 거치지 않고서도 열처리할 수 있기 때문에 건조에 소요되는 비용과 시간을 절약할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 목재 내 수분이 감소함에 따라 발생하는 할렬이나 틀어짐 등의 변형을 최소화하기 위해 여러 단계를 거치기 때문에, 열처리 장치 운용자는 열처리 기술에 대한 충분한 지식과 장치 운용을 위한 기술적 숙달을 필요로 하기 때문에 기술적인 제약이 따른다.

Table I -1. Comparison among the five wood heat treatment processes (Militz, 2002)

Heat Treatment Method	Nation	Media	Initial Moisture Content (%)	Treatment Temperature (°C)	Steps	Approximate Cost (Euro/m ³)
Oil-heat treatment	Germany	Hot oil	Air-dry (6%)	180~220	One Step	65~95
Thermo Wood	Finland	Steam	Fresh wood	150~240	Temperature rising and drying, Heat treatment, and Cooling/conditioning	
Rectification process	France	N ₂	Air-dry (12%)	200~240	One Step	150~160
Bois Perdure	France	Steam	Fresh wood	200~240	One Step	100
Plato process	Netherlands	Steam or air	Green or air-dry wood	170~190	Hydro-thermolysis, drying and curing	100

과열증기는 끓는점 이상의 온도를 갖는 증기를 의미한다(Figure I-1). 과열증기는 1940년대에 독일에서 처음 건조 산업에 적용되었으며 현재 목재뿐만 아니라 식품이나 하수 슬러지 등의 건조에 널리 이용되는 건조 매개체이다(Mujumdar, 1995). 과열증기 건조는 과열증기와 피 건조물 사이의 직접적인 접촉을 통해 건조가 이루어진다(Deventer and Heijmans, 2001). 건조 매개체인 과열증기는 피 건조물 내 수분을 증발시키기 위한 열을 피 건조물에 제공하고 증발된 증기를 외부로 이송한다. 전 건조 공정 동안 증기는 항상 응축 온도 이상에 머물러 있게 된다(김 등, 2008). 목재를 160~260°C 온도 범위의 과열증기에 노출시키면 열가수분해(Thermal hydrolysis)에 의해 목재 주성분이 변하면서 열처리가 이루어지고, 적정 압력을 유지하면 할렬과 같은 건조 결함 발생하지 않는다(박, 2012; Park *et al.*, 2014). 즉, 일정한 온도와 압력을 유지시키는 One-step 공정에 의해서도 생재 상태의 목재를 건조 결함 없이 열처리할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만, 기존의 연구에서는 특정 온도와 압력 조건의 과열증기를 통해 생재 목재의 열처리 가능성을 실험적 결과로서 제시할 뿐 건조 결함 발생에 대한 기작 분석은 제시된 바 없다.

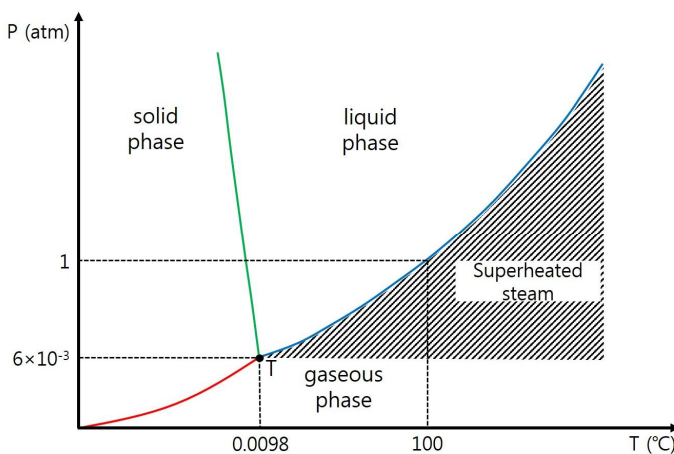


Figure I-1. Phase equilibrium curve of the water

수분 감소에 따른 목재의 건조 결함은 세포의 수축 변형에 의해 발생하고, 목재의 세포벽 구조나 세포 간 결합력 등에 따라 결함의 발생 정도가 다르게 나타난다. 비등점 이하에서 목재의 수축 변형과 건조 응력 등에 대한 다양한 연구가 수행되어왔으나 비등점 이상의 온도를 갖는 과열증기에서 목재의 수축 변형과 건조 응력 등에 대한 연구는 해석의 어려움으로 인해 충분히 이루어지지 않았다. 특히, 열처리가 수행되는 온도 조건에서는 목재 주성분의 화학적 변화가 동반되기 때문에 열처리 온도 조건에서의 목재 주성분의 화학적 변화와 세포 구조적 변화 그리고 이에 따른 건조 응력 간의 상호작용에 대한 연구가 필요하며, 이를 통해 과열증기 건조-열처리 공정에서 건조 결함이 발생하는 기작을 구명할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 목표

본 연구의 연구 목표를 요약하면 다음과 같다.

- 고온·고압의 과열증기를 이용하여 생재를 건조-열처리할 때, 할렬이 발생하지 않는 과열증기 조건(압력 및 온도)과 건조-열처리 공정 시간을 결정한다.
- 고온·고압의 과열증기를 이용하여 생재를 건조-열처리할 때, 목재 주성분의 화학적 변화를 분석한다.
- 고온·고압의 과열증기를 이용하여 생재를 건조-열처리할 때, 목재 세포벽의 구조적인 변화와 세포벽 내 결함 부위를 탐지한다.
- 고온·고압의 과열증기 조건에서 목재 내부에 발생하는 건조 응력과 유변학적 거동에 대해 분석한다.
- 최종적으로 고온·고압의 과열증기를 이용하여 생재를 건조-열처리할 때, 목재 주성분의 화학적 변화와 세포벽의 구조적인 변화 및 그에 따른 목재 내 건조 응력과 유변학적 거동 간의 상호작용에 대해 분석하고, 이를 바탕으로 과열증기 생재 건조-열처리 공정에서 건조 결함이 발생하지 않는 원인을 분석하고자 한다.

3. 연구사

3.1. 목재 열처리에 관한 연구

열처리 목재에 대한 기원은 고대 이집트에서 찾을 수 있다. 고대 이집트인들은 불에 그슬린 목재는 치수 변화가 적고, 잘 썩지 않는다는 것을 알고 이를 이용했다고 전해진다(정, 2004). 우리나라의 경우에도 삼국사기 등의 역사서에서 유사한 사례가 전해지고 있다(정, 2004). 목재 열처리에 대한 현대적인 연구는 1920년 Tiemann의 연구 결과에서 처음 보고되었는데 그는 고온에서 건조한 목재는 팽창수율이 낮아지고, 이에 따라 팽윤율이 줄어드는 것으로 보고하였다. 최초의 열처리는 고온의 열기를 이용하였으나 화재의 위험성을 줄이고, 수축 및 팽윤을 최소화하기 위해 여러 가지 기체를 이용한 열처리 방법에 대한 연구가 수행되었다(Stamm and Hansen, 1937). 이후 열처리 목재 상업화를 목적으로 “Lignostone”, “Lignifol”, “Staypack”, “Staybwood” 등의 열처리 목재 제품이 개발되었지만 모두 상업화되지 못 했다(Kollmann, 1936; Stamm *et al.*, 1946; Seborg *et al.*, 1956). 다만, 고온의 열기를 이용한 열처리 효과에 대한 연구가 간헐적으로 수행되어왔다 (Seborg *et al.*, 1953; Kollmann and Schneider, 1963; Kollmann and Fengel, 1965; Fengel, 1966a, b; D’Jakonov and Konepleva, 1967; Nikilov and Enceev, 1967; Noack, 1969; Rusche, 1973a; Rusche, 1973b; Burmester, 1973; Burmester, 1975; Giebeler, 1983; Hillis, 1984).

최근 지속가능한 건축 재료에 대한 수요의 증가, 아열대 지역 산림 파괴 그리고 독성 물질 사용을 줄이기 위한 규제 강화 등의 이유로 인해 유럽을 중심으로 열처리 목재에 대한 관심이 다시 증가하기 시작했다(Boonstra, 2008). 이에 따라 다양한 열처리 방법이 개발되었으나 핀란드의 Thermowood법, 네덜란드의 Plato법, 독일의 OHT(Oil heat

treatment)법, 그리고 프랑스의 Bois Perdure법과 Rectification법 등 다섯 가지 열처리 방법이 가장 많이 사용되는 방법으로 알려져 있다 (Militz, 2002).

핀란드의 Thermowood법은 가장 많이 사용되는 열처리 방법으로서 유럽에서 생산되는 열처리 목재의 90%를 차지하는 것으로 알려져 있다(Boonstra, 2008). 이 방법은 세 단계로 구성되어 있다(Figure I-2). 먼저, 반응기를 가열하여 내부 증기의 온도를 100℃까지 빠르게 가열시킨 다음 130℃까지 천천히 가열시키면서 반응기 내부 상대습도를 거의 0%까지 떨어뜨린다. 목재의 열처리는 185~230℃ 온도 범위에서 2~3시간 동안 집중적으로 이루어지며, 끝으로 내부 증기의 온도를 80~90℃까지 떨어뜨리면서 목재 내부의 건조 응력을 완화시키게 된다 (Viitaniemi *et al.*, 1997).

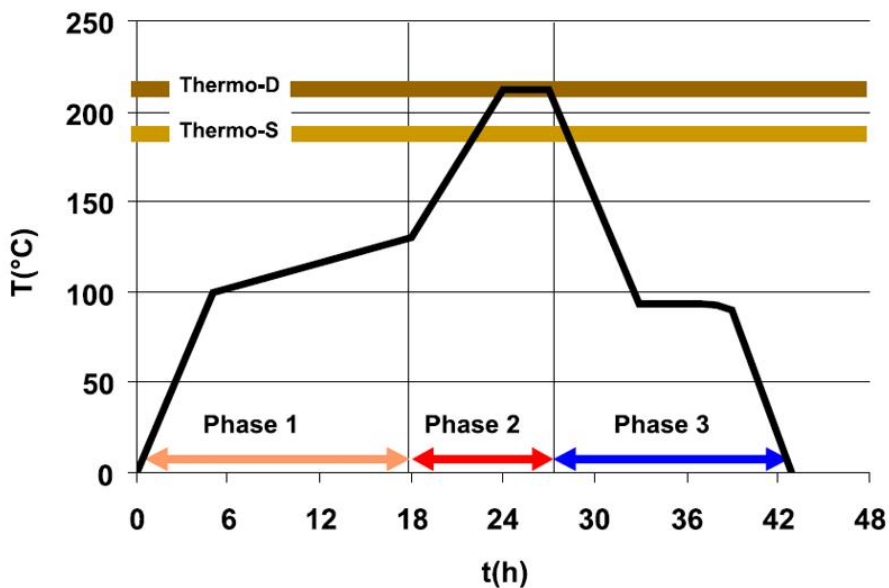


Figure I-2. Three steps of thermowood method

네덜란드에서 이용되는 Plato법은 네 단계로 구성되어 있다(Boonstra *et al.*, 1998; Militz, 2002). 1단계는 hydrothermolysis로서 대기압 이상의 압력과 다습한 조건에서 160~190℃ 범위의 온도로 4~5시간 동안 가열시키는 단계이다. 2단계에서 목재는 통상적인 방법으로 약 10%의 평형함수율까지 3~5일에 걸쳐서 건조된다. 3단계에서 목재는 다시 170~190℃ 범위에서 14~16시간 동안 낮은 상대습도 조건에서 가열된다. 마지막으로 4단계에서는 목재의 함수율을 이용함수율까지 상승시키게 된다. 공정의 전체적인 처리 시간은 수종, 두께 및 생산된 열처리재의 용도 등에 따라 결정되고, 열처리 매개체로는 고온의 증기나 열기가 사용된다.

프랑스에서는 Rectification법과 Bois Perdure법이 이용되고 있다(Militz, 2002). 먼저 Rectification법은 12%로 건조된 목재가 이용되며, 공기 중 산소의 농도를 2% 이하로 제거한 대기를 200~240℃로 가열하여 열처리에 사용한다. Bois Perdure법에서는 생재 상태의 목재를 증기나 연소 가스를 이용하여 빠르게 건조시킨 다음 반응기 외부로 배출된 증기나 연소 가스를 200~240℃의 온도로 가열하여 다시 반응기 내부로 투입해 목재를 열처리한다.

독일에서는 고온의 Oil을 사용하는 OHT(Oil heat treatment)법을 이용하고 있다(Militz, 2002). 가열된 Oil은 관을 통해 생재 목재가 잔적되어 있는 반응기 내부에 주입되고 2~4시간의 가열과 2~4시간의 냉각을 반복하며 총 18시간 동안 진행된다. Oil을 이용한 열처리 방법은 목재로의 열전달을 촉진시키며, 산소가 존재하지 않기 때문에 화재나 산화의 위험이 적다는 장점이 있지만 다량의 Oil이 목재 내부로 침투하여 목재의 물성이 크게 변한다는 단점이 있다.

국내에서도 열처리 목재에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 열처리 방법의 가장 기본이 되는 건조된 목재를 고온의 열기를 이용하여 열처리한 후 재색변화, 강도, 수축률, 평형함수율, 수지제거율 등을 평가한 연

구들이 보고되었다(윤 등, 2009; 김 등, 2009; 김 등, 2010; Won *et al.*, 2015; Hidayat *et al.*, 2017a; 2017b; 2017c). 또한, Oil이나 과열 증기를 이용하여 열처리한 목재의 물성을 평가한 연구 결과도 보고된 바 있다(김과 강, 2005; 박 등, 2012; 임 등, 2014; 이 등, 2015).

3.2. 열처리에 의한 목재 세포벽 주성분의 화학적 변화에 관한 연구

목재는 천연 고분자재료로서 주로 탄수화물(셀룰로오스와 헤미셀룰로오스)과 리그닌 및 소량의 추출물로 구성되어 있다. 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 그리고 리그닌은 목재 세포벽의 구조적인 성분인 반면에 추출물은 주로 세포 내강의 표면이나 세포 간 공극에 저장되어 있는 다양한 천연물로 구성된 저분자 물질이다.

셀룰로오스는 침엽수와 활엽수 모두에서 전건 중량 대비 약 40~45%의 비중을 차지하며 목재에서 가장 많은 비중을 차지한다. 셀룰로오스는 β -(1-4)-glycoside 결합에 의해 연결되어 있는 β -D-glucopyranose 단위체의 선형 고분자이다(Sjöström, 1981). 셀룰로오스에서 실제로 반복되는 단위는 cellobiose로서 2개의 인접한 glucose 단위체들에 의해서 형성된다(Figure I-3).

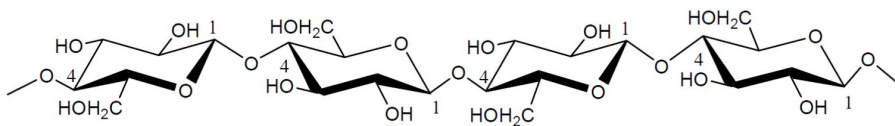


Figure I-3. Structure of cellulose showing the repeating cellobiose unit

헤미셀룰로오스는 다양한 당으로 구성되어 있는 비결정성의 가지가 많은 고분자이다. 주된 구성단위는 xylose와 arabinose와 같은 5탄당과 glucose, mannose 그리고 galactose와 같은 6탄당이다. 헤미셀룰로오스는 침엽수에서는 전건 중량 대비 20~25%, 활엽수에서는 전건 중량 대비 25~30%의 비중을 차지하며 화학적인 구성성분 또한 침엽수와 활엽수에서 차이를 보인다(Sjöström, 1981). 침엽수의 경우 가장 풍부한 헤미셀룰로오스는 galactose, glucose 그리고 mannose 단위체로 구성된 galactoglucomannan이고(Figure I-4), 활엽수의 경우 주된 헤미셀룰로오스는 xylose 단위체와 4-O-methylglucuronic acid 그룹으로 구성된 glucuronoxylan이다(Figure I-5).

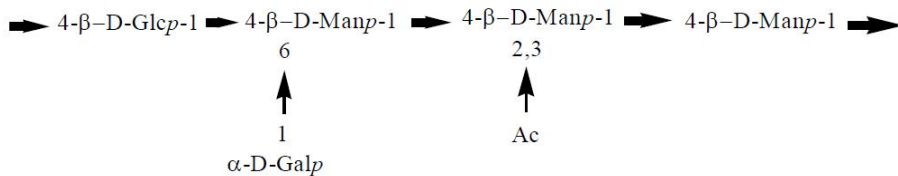


Figure I-4. Abbreviated formulas for galactoglucomannan from softwood

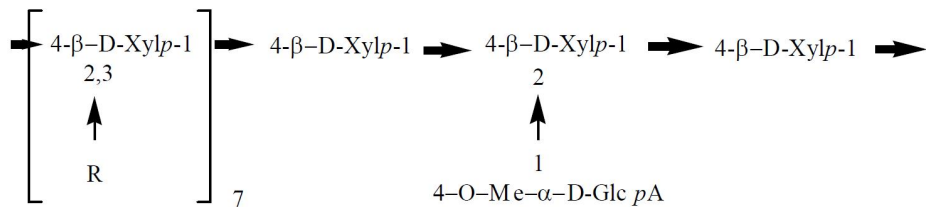


Figure I-5. Abbreviated formulas for glucuronoxylan from hardwood

리그닌은 비결정성의 고분자 물질로서 침엽수에서는 셀룰로오스 다음으로, 활엽수에서는 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 다음으로 많은 양을 차지하고 있다. 리그닌은 탄소와 수소 그리고 산소로 구성되어 있지만 탄수화물은 아니며 phenylpropane 단위체에 복잡한 polyphenol 화합물이 결합된 구조를 갖는다(Sjöström, 1981). 리그닌의 구조는 어떠한 규칙적인 반복 패턴을 갖지 않는다. 현재까지의 기술력으로는 천연 상태의 리그닌을 화학적 변화 없이 목재로부터 분리하는 것은 불가능하다(Alén, 2000). 이러한 이유에서 리그닌의 화학적 성질과 구조는 아직 완벽하게 밝혀지지 않았다. 일반적으로 리그닌은 침엽수에서 전건 중량 대비 25~35%, 활엽수에서 전건 중량 대비 18~25%의 비중을 차지한다. 침엽수의 리그닌은 대체로 guaiacyl lignin으로 언급되는데 이는 구성 단위체의 90% 이상이 trans-coniferyl alcohol로부터 유래되기 때문이다(Alén, 2000). 반면에 활엽수의 리그닌이 guaiacyl-syringyl lignin으로 언급되는데 이는 활엽수의 리그닌은 약 50%의 trans-coniferyl alcohol과 약 50%의 trans-sinapyl alcohol로부터 유래된 구성단위로 이루어져 있기 때문이다.

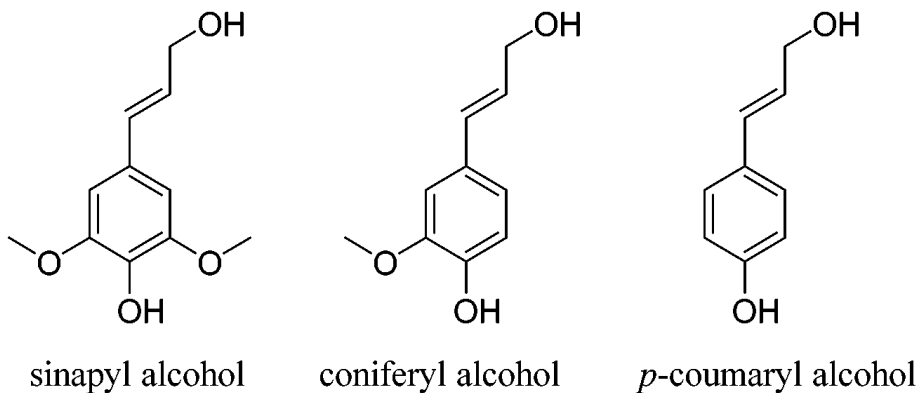


Figure I -6. Main building units of lignin in wood

열처리에 의해 목재 주성분의 화학적 조성은 세포벽의 구성 성분과 추출물의 감소로 인해 변하게 된다(Figure I-7). 열처리에 의한 화학적 성분 변화는 열처리 온도와 시간에 따라 변하는데 특히, 열처리 온도에 크게 좌우된다. 20~150°C 범위의 낮은 온도에서 목재는 구성 성분의 건조에 따른 자유수 이탈 및 결합수 제거가 진행된다. 반면에, 열처리에 주로 이용되는 160~260°C의 온도 범위에서 목재는 중요한 화학적인 변화를 겪게 되고, 260°C 이상의 온도에서 목재는 CO₂와 같은 열분해 산물을 생성하면서 탄화가 시작된다.

헤미셀룰로오스는 가장 낮은 온도에서도 열처리의 영향을 받는 목재의 주요 성분이다. 탈아세틸화에 의해 헤미셀룰로오스의 분해가 시작되며 방출된 acetic acid는 다당류의 분해를 촉진시키는 촉매 역할을 하게 된다(Tjeerdsma *et al.*, 1998; Sivonen *et al.*, 2002; Nuopponen *et al.*, 2004).

셀룰로오스는 열처리에 의한 영향이 헤미셀룰로오스에 비해 미미한데 이는 결정영역의 영향인 것으로 생각된다. Bourgois와 Guyonnet(1988) 및 Yildiz 등(2006)에 따르면 산소를 제거한 260°C 공기에서 소나무를 열처리한 결과 셀룰로오스의 함량이나 구조에는 큰 변화가 없었다.

리그닌은 열처리에 의해 상대적 함량비가 증가하는 경향을 나타내었다. *Pinus pinaster*를 260°C 온도에서 각각 0.5시간, 1시간 그리고 4시간 동안 열처리하였을 때 리그닌의 함량비는 최초 28%에서 41%, 54%, 84%로 증가하였다(Bourgois and Guyonnet, 1988). 가문비나무, 전나무 그리고 포플러나무를 열처리한 결과 무처리재에 비해 리그닌의 함량비는 증가하였으며, 헤미셀룰로오스의 함량비는 감소하였다(Dirol and Guyonnet, 1993). 많은 연구 결과들이 열처리에 의해 리그닌의 함량비가 증가한 것으로 보고하고 있지만 리그닌 함량비를 측정하는 표준 방법에 의해 추출된 리그닌은 천연 리그닌이 아닌 것으로 생각된다. 많은 연구자들이 리그닌이 다른 세포벽 성분들과 상호 결합하는 중

축합반응에 의해 외관상으로 리그닌의 함량비가 증가하는 것처럼 보인다고 주장하였다(Tjeerdsma and Militz, 2005; Boonstra and Tjeerdsma 2006; Esteves *et al.*, 2008). 리그닌 함량비의 증가에도 불구하고 헤미셀룰로오스보다는 낮은 비율로 리그닌의 분해가 발생한다는 여러 가지 증거가 다양한 연구자들에 의해 보고되었다(Windeisen *et al.*, 2007; Esteves *et al.*, 2008). 특히, Kotilainen 등(2000)은 *Pinus sylvestris*와 *Picea abies* 열처리재를 FTIR 분석한 결과 리그닌에서 carbonyl group이 증가함을 확인하였는데 이는 리그닌이 다른 세포벽의 주성분 특히, 열처리에 의해 분해된 헤미셀룰로오스와 결합한 증거로 생각된다.

열처리에 의해 대부분의 휘발성 추출물은 제거되거나 분해되고, 세포벽으로부터 분해되어 새로운 화합물이 생성된다. Bourgois 등(1989)은 240~290°C 범위의 온도에서 열처리한 *Pinus pinaster*로부터 왁스, 탄수화물, 타닌, 레진 그리고 소량의 헤미셀룰로오스를 추출하였다. Esteves 등(2008)은 열처리에 의해 목재의 원래 추출물은 거의 모두 제거되지만 목재의 질량 손실이 커짐에 따라 추출물의 함량비는 증가하는 것으로 보고하였으며, 이는 대부분 다당류의 분해에 따른 산물이나 에탄올 추출물에 의한 영향인 것으로 생각된다.

열처리에 의해 액상 또는 기체상의 화합물이 형성된다. 200~300°C 범위의 온도에서 생성된 액상 화합물은 대부분 물과 acetic acid이지만 소량의 formic acid와 furfural 그리고 methanol이 생성된다. 생성된 산은 다당류 분해의 촉매로 작용하고, 다당류의 중합도를 감소시킨다(Militz, 2002). 이렇게 다당류가 분해되면서 formaldehyde, furfural 그리고 다른 aldehyde가 만들어진다(Tjeerdsma *et al.*, 1998).

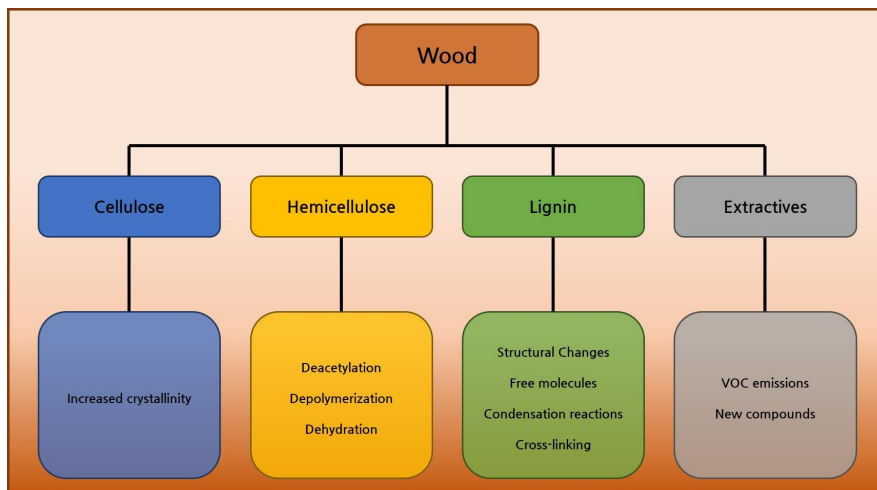


Figure I-7. Chemical changes occurring in the main component of wood due to heat treatment (Esteves and Pereira, 2009)

3.3. 열처리에 의한 목재 세포벽 구조 변화에 관한 연구

목재의 세포벽은 크게 1차벽(Primary wall)과 2차벽(Secondary wall)으로 구성되어 있고, 2차벽은 다시 3개의 층(S1, S2, S3)으로 구분된다 (Figure I -8). 2차벽을 구성하는 3개의 층은 서로 다른 마이크로피브릴 배향을 갖는다. 세포간층(middle lamella)은 주로 리그닌으로 구성되어 있으며 인접한 세포들을 서로 결합시켜주는 역할을 한다. 세포간층과 1차벽의 경계는 명확하지 않으며, 세포간층과 인접한 1차벽과의 결합부위는 종종 compound middle lamella (CML)라는 용어로 불린다 (Fengel and Wegener, 1989, Alén, 2000).

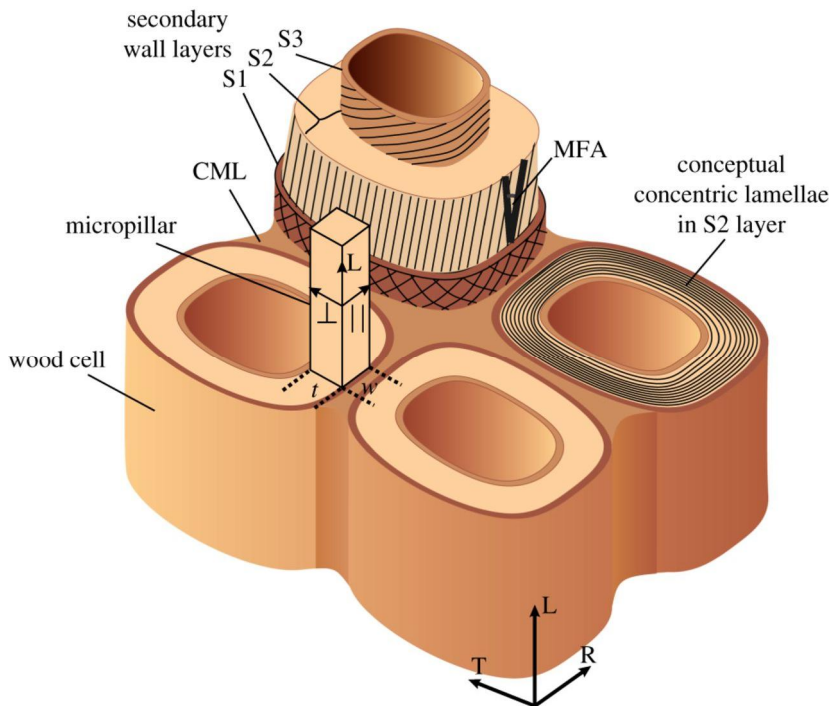


Figure I -8. Schematic of cell wall layers within cellular structure of wood (Rafsanjani *et al.*, 2014).

목재 섬유는 조재 섬유와 만재 섬유로 구분될 수 있다. 조재는 성장초기에 빠른 성장 속도로 생성되고, 만재는 성장후기에 느린 속도로 생성된다. 이러한 이유에서 만재 섬유는 조재 섬유보다 세포벽의 두께가 두껍고, 세포내강의 크기가 작다. 조재와 만재의 세포벽 두께의 차이는 S2층 두께의 차이에 기인한다(Figure I-9).

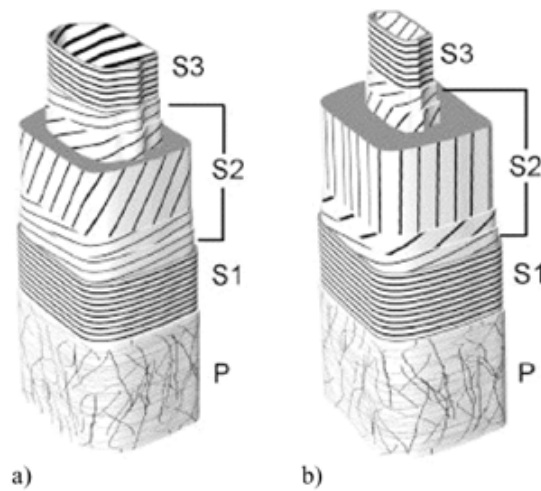


Figure I-9. Cell wall models of Norway spruce tracheids
(Brändström, 2002)
a) early wood tracheid, b) latewood tracheid

Fengel과 Wegener(1989)는 150°C에서 열처리된 가문비나무를 전자현미경을 통해 관찰한 결과 S1층과 S2층의 사이 그리고 세포벽의 구석에서 할렬이 발생하였음을 확인하였다.

Boonstra 등(2006a, b)은 열처리는 목재의 해부학적 구조에 영향을 미치지만 그 효과는 수종과 열처리 조건에 따라 다를 것을 보고하였다. 침엽수의 경우 만재 부위에서 접선방향으로 할렬이 가장 많이 발생하였으며 특히, 좁은 연륜을 따라서 조재와 만재가 이행되는 부분에서 가장 많이 발생하였음을 보고하였고, 소나무를 열처리하였을 때, 방사유조직과 변재의 수지구 주변 에피텔리얼 세포가 손상되었음을 보고하였다. 또한 활엽수를 열처리한 경우, 너도밤나무와 포플러나무와 같은 수종은 도관과 도관 주변의 섬유가 파괴되었으며, 방사조직 주변으로 방사방향의 할렬이 발생하였음을 보고하였다.

Hietala 등(2002)은 열처리에 의해 목재 관공의 크기가 커졌음을 확인하였다. 이는 아마도 세포벽 성분이 분해되었기 때문인 것으로 생각되지만 세포의 크기 면에서는 큰 차이를 발견하지 못 했다.

Andersson 등(2005)은 열처리에 의한 마이크로피브릴 경사각의 변화는 없었으며 세포벽의 공극률이 증가하였다고 언급하였다.

3.4. 열처리 중 목재 내에서 발생하는 응력에 관한 연구

목재는 주위 상대습도 변화에 따라 수분을 흡수하거나 방출한다. 그에 따라 목재 내부는 불균일한 함수율 분포를 나타내고 부위별로 서로 다른 수축 또는 팽윤을 발생시킨다. 특정 부분의 수축 또는 팽윤은 인접한 다른 부분에 의해 억제되고 이에 따라 응력이 발생한다. 목재의 기계적 강도는 섬유방향이 섬유 직각방향에 비해 매우 크기 때문에 섬유 직각방향에서의 응력은 목재 이용의 측면에서 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 주위 상대습도 변화에 따른 목재의 기계적 성질에 관한 다양한 연구가 수행되어왔다(Mårtensson, 1992; Hanhijärvi, 1998).

슬라이스 법은 얇고 긴 소시편을 절단하여 제작한 슬라이스의 길이 변화를 통해 응력을 측정하는 방법으로 다양한 연구가 수행되어왔다(McMillen, 1955; Svensson and Toratti, 2002, Han *et al.*, 2017). Figure I-10은 적참나무(*Quercus rubra*)의 천연건조 중 발생하는 응력을 측정하여 제시한 결과이다(McMillen, 1955). 건조 초기에 목재 표면에는 인장응력이 발생하였고, 내부에는 압축응력이 발생하였다. 이는 목재 표면은 건조되어 수축하려는 힘이 발생했지만 목재 내부는 아직 건조되지 않아 표면이 수축하려는 힘을 억제하는 응력이 발생하였음을 의미한다. 목재 내부가 건조됨에 따라 표면의 인장응력은 점차 줄어들고, 내부의 압축 응력도 균형을 맞추게 된다. 건조가 계속 진행되면 내부의 수축은 이미 수축이 끝난 표면에 의해 억제된다. 이 때 응력의 분포가 건조 초기의 양상과 반대로 나타나게 되는데 이러한 현상을 응력역전 또는 표면경화라 한다.

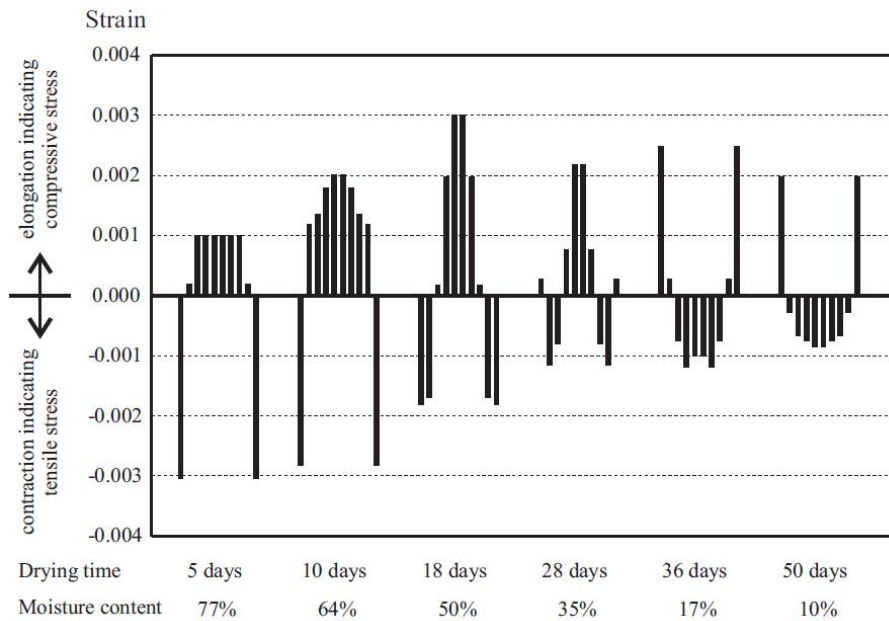


Figure I –10. Strain distribution in 50 mm oak (*Quercus rubra*) during air drying (McMillen, 1955)

목재가 건조되는 동안 발생하는 할렬이나 틀어짐 등의 결함은 목재의 수축과 관련되어 있다. 특히, 목재 내부 함수율 분포의 차이에 의해 발생하는 수축량의 차이나 방향별로 다르게 나타나는 수축량의 차이에 의해 건조 결함이 유발된다. 표면 할렬(surface check)은 주로 판목재의 표면에서 방사조직을 따라 발생되며, 건조 과정에서 표면에 발생한 건조 응력이 목재의 접선방향 인장강도를 초과할 때 발생한다. 횡단면 할렬(end check) 역시 표면 할렬과 같이 건조 초기에 목재의 방사조직을 따라 발생하며, 목재 내에서 수분의 이동 속도가 섬유직각방향보다 섬유방향에서 더 빠르기 때문에 양 쪽 끝 부분이 중앙보다 더 빨리 건조된다. 이에 따라 목재의 양 쪽 끝부분과 중앙 부분에 응력이 발생하여 횡단면 할렬이 나타난다(Simpson, 1991). 내부 할렬(internal check)은 방사조직을 따라 목재 내부에서 섬유직각방향으로 발생하며 이는 목재 내부에서 발생한 인장응력에 의해 생기는 결함이다(Perré, 2007; Tarmian *et al.*, 2009). 내부 할렬은 목재 내부가 섬유포화점 이상의 높은 함수율을 유지한 상태에서 고온으로 장기간 건조될 때 발생하기 때문에 내부 할렬을 방지하기 위해서는 목재 내부가 섬유포화점 이하로 건조되기 전에 고온에 노출시키지 않아야 한다.

3.5. 목재의 점탄성 모형과 유변학적 거동에 관한 연구

고분자물질은 많은 원자가 공유결합으로 연결된 분자로 이루어진 물질로서 거대분자물질(macromolecular material)이라고도 한다. 고분자 물질은 그 상태(액체 또는 고체)에 상관없이 고체의 특성인 탄성과, 액체의 특성인 점성을 모두 가지고 있기 때문에 점탄성(viscoelasticity)을 가진 물질이라고 하며 이러한 물질을 간단히 점탄성체(viscoelastic body)라고도 한다(김, 2001).

어떤 물체에 힘을 가하면 물체는 그 힘에 대응하여 변형하고, 변형의 크기는 힘에 비례한다. 그 힘이 인장력인 경우의 비례상수를 인장탄성계수라고 하는데 이 탄성계수는 물질의 고유한 성질 중의 하나로 이 값이 크면 물질은 강직한 것으로 변형이 작고, 이 값이 작으면 물질은 유연하여 변형이 크다.

Figure I-11과 같은 원통형 고분자 물질의 인장 실험의 경우, 원통의 길이를 l , 단면적을 A 라고 하고 축방향으로 작용하는 인장력(F)에 의하여 그 길이가 l 에서 $l + \Delta l$ 로 늘어났다고 하면 이때 인장응력(σ_t)은

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (\text{Eq. I - 1})$$

로 정의된다.

또 인장변형률(tensile strain, ε_t)은

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Eq. I - 2})$$

로 정의되며 차원은 없다.

σ_t 와 ε_t 와의 관계는 Hooke의 법칙에 의하여

$$\sigma_t = E\varepsilon_t \quad (\text{Eq. I - 3})$$

로 나타낼 수 있는데 여기에서 E 는 인장탄성계수라고 하고, 인장력이 정적 하중인 경우이므로 E 값은 시간에 따라 변하지 않고 일정한 값을 갖는다.

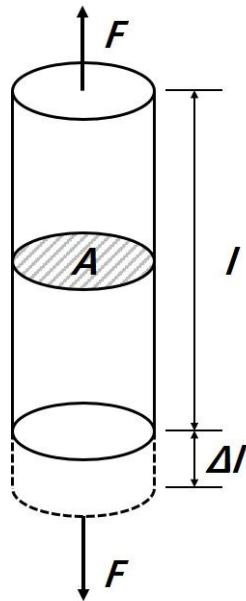


Figure I -11. Tensile test for cylindrical polymeric material

하지만 고분자 물질의 탄성계수는 시간에 따라 변화하는 시간의 함수인 경우가 많다. 즉 고분자 물질에 일정한 크기의 인장 하중을 오랫동안 작용시키면 변형률은 점점 증가하게 되어 탄성계수는 시간에 따라 작아지고, 반대로 고분자물질을 일정 길이만큼 신장시키는 데 필요한 힘은 시간이 경과하면서 점차 감소한다.

만일 고분자 물질에 $\sin\omega t$ 에 비례하는 요동 함수적인 변형이 가해지는 실험을 가정한다면, 이상 탄성체의 경우, 응력($\sigma(t)$)과 변형률($\varepsilon(t)$)은 Hooke의 법칙에 따라

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) \quad (\text{Eq. I - 4})$$

로 나타낼 수 있으며 이 탄성체에 진폭이 ε_0 인 \sin 파 변형률(sinusoidal strain)

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin\omega t \quad (\text{Eq. I - 5})$$

을 가하면 탄성체의 응력은

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 \sin\omega t \quad (\text{Eq. I - 6})$$

이 되어 입력 변형률($\varepsilon(t)$)과 출력 응력($\sigma(t)$)은 위상차가 전혀 없어 변형률이 최대이면 응력도 최대가 된다. 즉 시험편에 어떤 변형률을 가하면 응력이 즉시 생겨서 시간의 지연(time lag)이 없다. 이 관계를 나타낸 것이 Figure I -12의 A와 B이다.

또한, 순수 점성체에 sin파 변형률(Eq. I -5)을 가하면 이 점성체의 거동은 Newton의 법칙

$$\sigma(t) = \eta \dot{\varepsilon}(t) \quad (\text{Eq. I - 7})$$

으로 나타낼 수 있는데 여기에서 η 는 점성계수이고, $\dot{\varepsilon}(t)$ 는 $\varepsilon(t)$ 의 시간에 관한 일차도함수이다. 그러므로 응력은

$$\sigma(t) = \eta \varepsilon_0 \omega \cos \omega t \quad (\text{Eq. I - 8})$$

가 된다. 이것을 나타낸 것이 Figure I -12의 C이다. Figure I -12의 A와 C를 비교하면 순수 점성체의 경우는 이상 탄성체의 경우와 달리 변형률(입력)과 응력(출력)의 위상차가 $\pi/2$ 만큼 발생한다. 즉, 응력은 변형률보다 $\pi/2$ 만큼 앞서게 된다. 이것은 점성체의 저항(점성계수 η) 때문에 나타나는 것이다. 이것으로 점성체와 탄성체의 응답의 차이를 알 수가 있다.

이상 탄성체와 순수 점성체가 sin파 변형을 받을 때 한 주기 동안 이 물체의 단위 부피가 한 일(W)에 대해 이상 탄성체의 단위 부피가 한 주기 동안 한 일(W_e)은

$$W_e = \int_0^{2\pi} \sigma(t) d\varepsilon(t) = \int_0^{2\pi} E \varepsilon_0^2 \omega \sin \omega t \cos \omega t dt = 0 \quad (\text{Eq. I - 9})$$

가 된다. 1/4 및 3/4 주기에서 소실된 에너지는 2/4 및 4/4 주기에서 회복되어 결국 0이 된다. 즉 한 주기 전체에 대해서는 손실되는 에너지도 없고 저장되는 에너지도 없다.

그러나 순수 점성체에 대해서 단위 부피가 한 주기 동안 한 일(W_v)은

$$W_v = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \eta \varepsilon_0^2 \omega^2 \cos^2 \omega t dt = \pi \eta \omega \varepsilon_0^2 \quad (\text{Eq. I -10})$$

로 되어 한 주기 동안의 에너지 손실은 $\pi \eta \omega \varepsilon_0^2$ 이 된다. 즉 저장되는 에너지는 없고, 에너지는 모두 손실된다.

즉, 이상 탄성체와 순수 점성체에 sin파 변형을 작용시키면 이상 탄성체는 응력과 변형의 위상차가 0이고 순수 점성체는 $\pi/2\omega$ 가 되며 한 주기 동안에 이상 탄성체는 손실되는 에너지가 없으나 순수 점성체는 $\pi \eta \omega \varepsilon_0^2$ 가 손실됨을 알 수가 있다. 그러므로 탄성과 점성을 모두 가진 고분자물질과 같은 점탄성체에 sin파 변형을 가하면 응력과 변형률 간의 위상차는 $0 \sim \pi/2\omega$ 의 값을 갖고, 변형률이 응력보다 $0 \sim \pi/2\omega$ 만큼 뒤서게 됨을 알 수 있다. 이것을 보인 것이 Figure I -12D이다. 또 점탄성체는 한 주기 동안에 에너지의 일부가 점성손실 때문에 발산됨을 예측할 수가 있다.

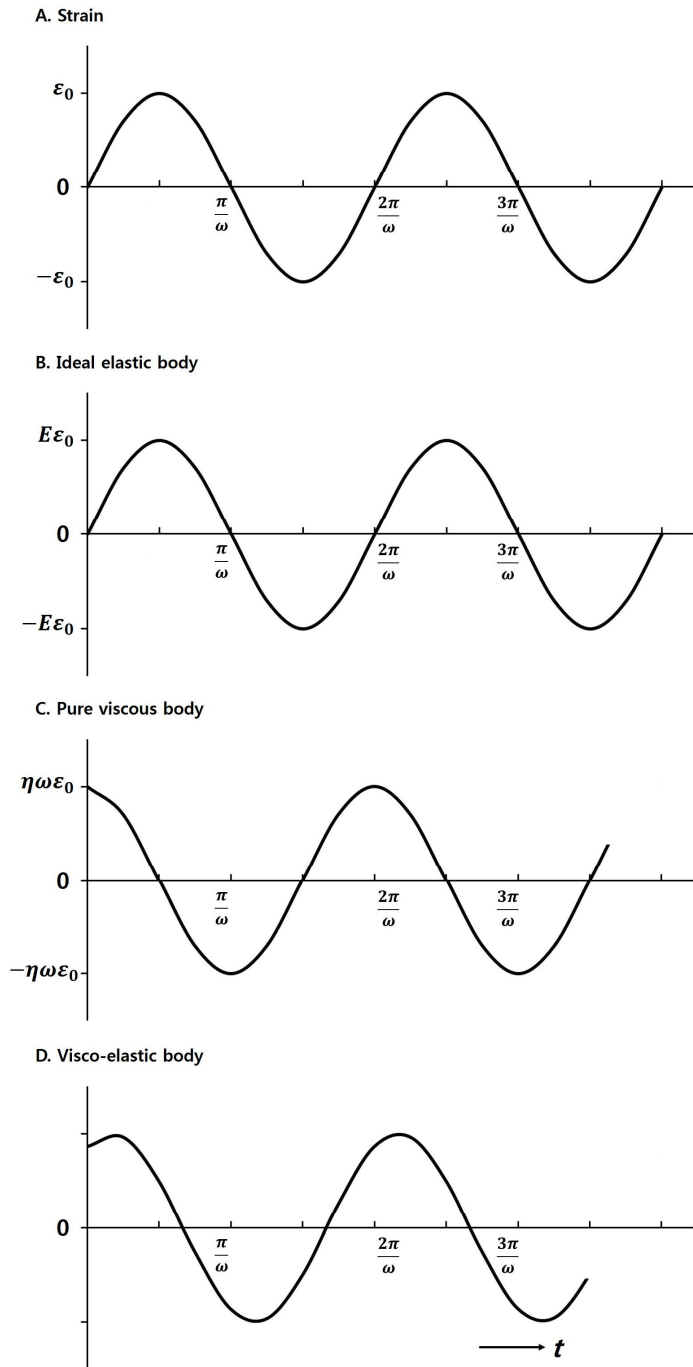


Figure I -12. Stress response by sinusoidal strain

목재가 장시간 또는 단시간 동안에 일정한 환경 조건에서 동일한 응력에 노출되었을 때, 시간에 따른 변형률을 크리프(creep)라고 한다. Figure I-13은 일정한 하중이 주어졌을 때 및 하중이 제거된 후의 변형을 모식적으로 나타낸 그림이다(Dinwoodie, 1989). 시간 t_0 에서 일정한 하중이 주어지면 순간적인 탄성 변형을 발생시킨다. 일정한 하중이 주어진 상태에서 시간이 경과하면 변형은 증가하지만 탄성 변형의 크기는 동일하고, 일정한 응력이 남아 있는 상태에서 크리프 변형이 진행된다. 시간 t_1 에서 하중이 제거되면, 변형 성분 중 탄성 변형은 순간적으로 제거되고, 시간이 경과함에 따라 크리프 변형 중 일정량이 회복된다. 크리프 변형 중 회복되는 변형량은 지연 탄성 크리프 또는 점탄성 크리프라고 하고, 회복되지 않는 요소를 점성 크리프라고 한다.

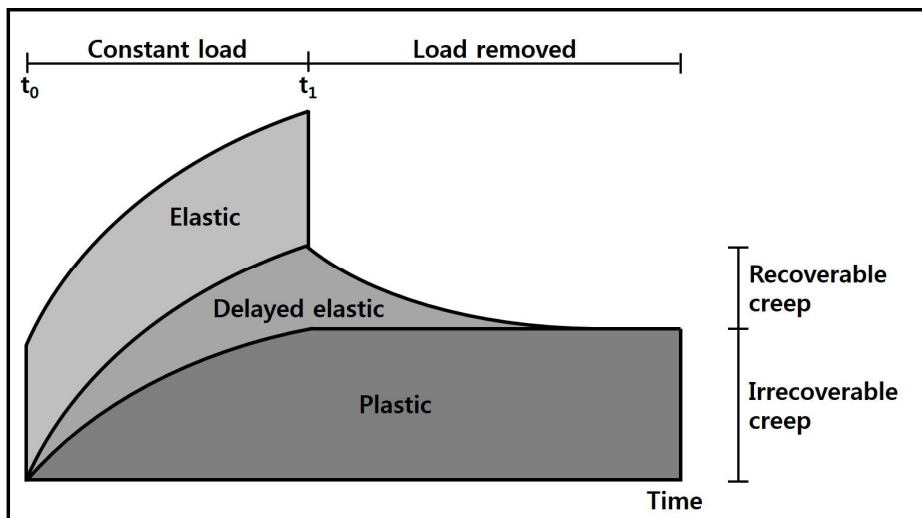


Figure I-13. Deformation due to constant load and after unloading (Dinwoodie, 1989)

Figure I -14는 일정한 단축(uniaxial) 응력에 의한 크리프 변형의 양상을 보여주는 모식도이다(Niemz, 1993). 장시간 동안 일정한 응력이 작용하는 경우에 크리프 변형은 세 단계로 구분할 수 있다. 1차 크리프는 하중이 주어짐과 동시에 크리프가 크게 증가하다가 점차 변형 속도가 감소하는 단계이다. 2차 크리프는 긴 시간동안 변형이 서서히 증가하는 단계이다. 3차 크리프는 파괴가 발생하기 직전에 변형이 급격하게 증가하는 단계이다. 하중이 주어진 재료는 3차 크리프로 인해 파괴가 발생할 수 있다.

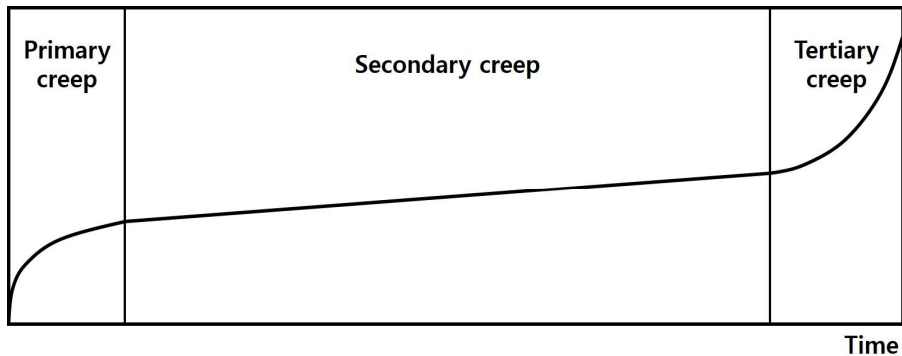


Figure I -14. Creep due to constant uniaxial stress and phases of creep (Niemz, 1993)

목재와 같은 고분자 물질의 점탄성적 거동을 기계적인 모형을 이용하여 여러 가지 역학적 성질을 예측하고자 하는 연구들이 수행된 바 있다. 이는 선형 탄성 요소(hookean element)와 선형 점성 요소(newton element)의 두 가지 기계적인 요소의 조합을 통해 설명된다. 선형 탄성 요소는 순수 탄성 요소라고도 하며 일반적으로 스프링(spring)으로 표현되고, 선형 점성 요소는 순수 점성 요소라고도 하며, 일반적으로 대시포트(dashpot)로 표현된다(Figure I-15).

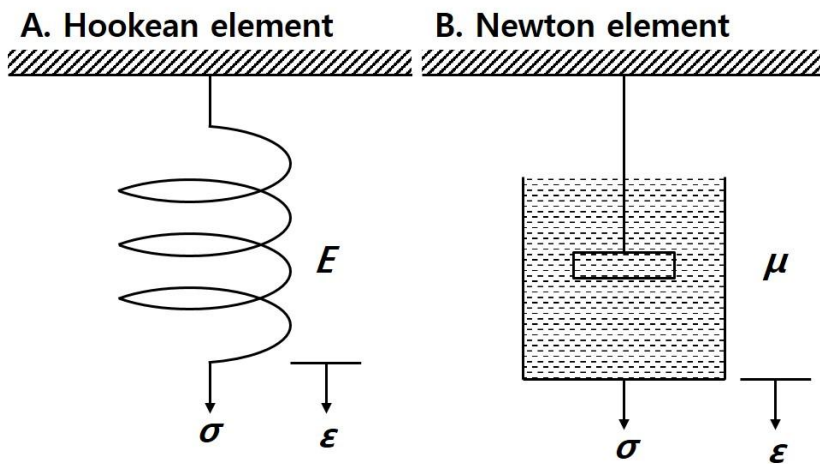


Figure I-15. Hookean (A) and Newton (B) element

목재의 점탄성 거동을 설명하는 기계적인 모형은 Figure I-16에서 제시하는 네 가지가 대표적이다. 이 중 목재의 크리프 변형을 설명하는 모델로 Burger body가 주로 이용된다. Burger body는 Eq. I-11과 같이 수학적으로 표현될 수 있다(Ma *et al.*, 2008).

$$\varepsilon = \sigma \left[\frac{1}{E_e} + \frac{1}{E_{ve}} (1 - e^{-t/\tau'}) + \frac{t}{\eta_v} \right] \quad (\text{Eq. I-11})$$

여기에서, E_e 는 탄성계수, E_{ve} 는 점탄성계수, η_v 는 영구 변형에서의 점성계수, $\tau' = \eta_{ve}/E_{ve}$ 를 의미한다. Eq. I-11에 나타나는 목재의 크리프 변형은 탄성, 점탄성 및 점성 부분으로 구분될 수 있다. 하지만 Burger body는 1차 크리프와 2차 크리프에서만 적용될 수 있고, 3차 크리프 및 파괴 단계에서는 적용될 수 없다(Ma *et al.*, 2008)

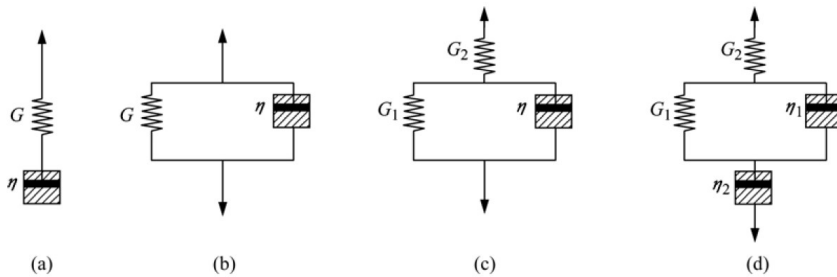


Figure I-16. Mechanical models of wood creep (Ma *et al.*, 2008)

- (a) Maxwell body
- (b) Kelvin body
- (c) Element model
- (d) Burger body

건조 중인 목재의 유변학적 모델은 Figure I -17과 같이 자유 수축 성분, 탄성 변형 성분, 점탄성 변형 성분, 점성 변형 성분 요소로 구분할 수 있다(Hanhijarvi 2000; Pang 2000; Moutee *et al.* 2007; Zhan *et al.* 2009; Han, 2014; Han *et al.*, 2017).

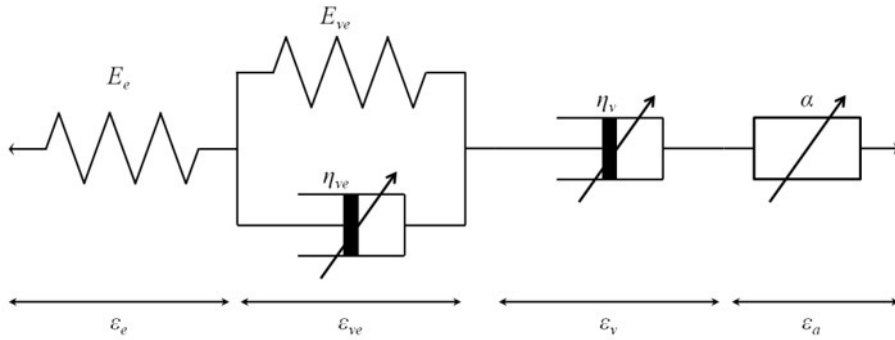


Figure I -17. Schematic representation of the rheological model during wood drying (Han, 2014)

E_e : elastic modulus, E_{ve} : visco-elastic modulus,

η_{ve} : viscosity coefficient for visco-elastic strain,

η_v : viscosity coefficient for permanent strain, α : shrinkage

ϵ_e : elastic strain, ϵ_{ve} : visco-elastic strain, ϵ_v : viscous strain,

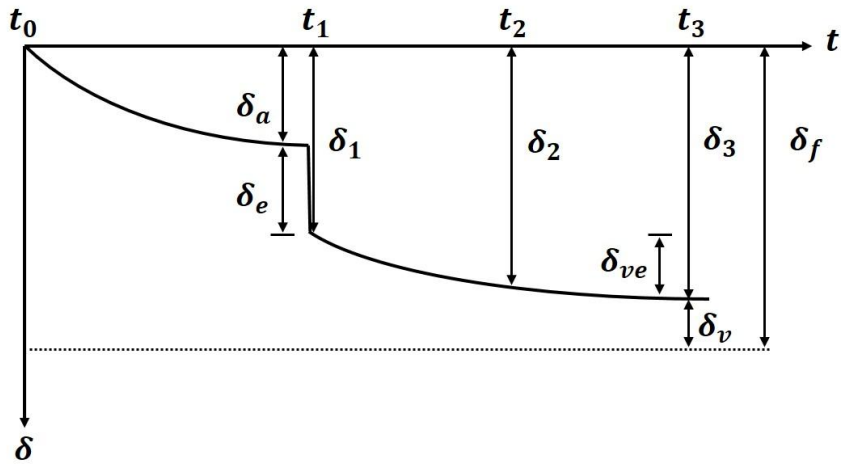
ϵ_a : actual strain

Figure I-17에서 제시한 건조 중인 목재의 유변학적 모델에 따라 목재 건조 중 발생하는 변형은 자유 수축 변형(δ_f), 함수율 감소에 따른 실제 변형(δ_a), 탄성 변형(δ_e), 점탄성 변형(δ_{ve}), 점성 변형(δ_v)으로 구분되며, 각각의 관계는 Eq. I-12와 같다(Figure I-18A).

$$\delta_f - \delta_a = \delta_e + \delta_{ve} + \delta_v \quad (\text{Eq. I-12})$$

자유 수축 변형은 응력이 존재하지 않는 상태에서 수분이 감소할 때 목재가 수축할 수 있는 최대치를 의미한다. 반면에 목재가 건조될 때는 건조 응력이 작용하기 때문에 자유 수축 변형과는 다른 변형이 발생한다. 이때, 실제 건조 중 목재가 수축하는 양을 실제 변형이라 한다. 탄성 변형은 목재에 작용하는 건조 응력이 해제됨과 동시에 회복되는 양을 의미하며, 점탄성 변형은 탄성 변형 직후, 점성적인 성질에 의해 지연 회복되는 변형을 의미한다. 점성 변형은 영구적으로 회복하지 못한 양을 의미한다. 각각의 변형은 실험적인 측정과 이론을 통해 결정될 수 있다. 자유 수축 변형은 얇은 소시편을 이용한 실험으로 측정할 수 있다. 실제 변형은 실제 목재를 건조하는 과정에서 측정할 수 있고, 탄성 변형과 점탄성 변형은 건조 중 단계 별로 제작한 슬라이스의 변형량을 통해 측정할 수 있다. 점성 변형은 점탄성 모델을 이용하여 자유 수축 변형량에서 나머지 변형량을 제한 값으로 결정될 수 있다.

A. Deformations during wood drying



B. Dimensional changes of slice

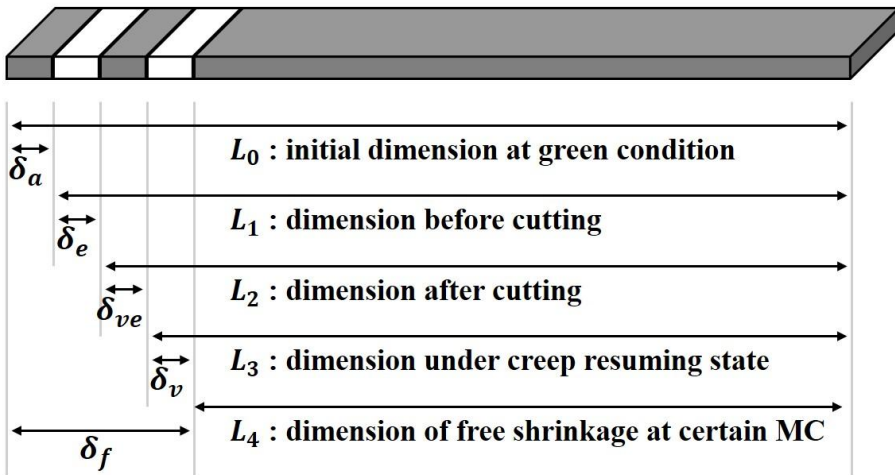


Figure I -18. Classification of deformation (A) and dimensional changes of slice (B) during the drying process (Han, 2014)

제 2 장

과열증기를 이용한 낙엽송
판재 건조-열처리 공정
제어 조건 결정

1. 서론

목재는 다공성의 생물재료로서 그 세포는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌 등의 다당류로 구성되어 있고, 세포내강이나 세포간극과 같은 공극이 존재한다. 목재의 주성분들은 부후균의 영양원이 되고, 공극 내 공기와 수분은 부후균 생장을 위한 필요조건을 제공한다. 부후균에 의해 썩은 부위는 재색이 변하고, 강도가 저하되며, 경우에 따라서는 악취가 발생한다. 변색된 목재는 제품의 가치가 떨어지고, 강도가 저하된 목재는 하중을 버틸 수 없기 때문에 매우 위험하다. 따라서 목재의 부후균에 대한 저항성을 높이기 위한 많은 연구가 수행되어왔다. 현재 내부후성을 제고하기 위해 가장 널리 이용되는 방법은 방부약제를 목재에 주입하는 것이다. 방부약제의 종류에는 CCA(Chromated copper arsenate), ACQ(Alkaline copper quaternary), CuAZ(Copper azole) 등이 있으며, 구리, 크롬, 비소 화합물 등을 주원료로 하고 있는 이들이 균이 접근하는 것을 차단하여 부후를 억제한다. 하지만 방부목에 함유된 방부약제는 대부분 유해화합물로 주변 토양과 하천을 오염시킬 가능성이 있으며 특히, 영유아기 어린이와 애완동물의 피부질환을 유발한다는 보고 등으로 환경 및 인체 유해성에 대한 논란이 지속되고 있다.

2000년대 초반 인체에 유해한 화학적 처리 방부목재 대신 인체에 무해한 열처리 목재를 친환경 방부목재로 사용해보고자 하는 연구들이 본격적으로 진행되기 시작했다. 열처리는 목재에 160~260℃의 열을 가하여 세포벽 구성 성분을 화학적으로 변형시킴으로써 물리-역학적 성질을 영구적으로 개선하는 방법을 말한다(Militz, 2002). 열처리에 의해 목재는 소수성이 증가하여 치수안정성이 커지고, 불균일한 표면재색을 균일하게 하며, 내부후성능이 향상된다. 하지만 열처리에 의해 목재는 강도가 감소하는 경향이 있다. 또한 열처리하기 전 목재를 충분히 건조시키지 않는다면 할렬이나 틀어짐, 깨짐 등의 건조결함이 발생하게 된

다. 결국 목재 열처리를 산업적으로 이용하기 위해서는 반드시 건조 공정을 거쳐야한다. 하지만 목재 건조 공정은 목재 이용을 위한 여러 가지 공정 중에서 에너지 사용량이 가장 많은 공정으로 알려져 있다. 또한 목재를 건조하는 데 시간이 오래 걸리고, 건조와 열처리가 서로 다른 장치에서 불연속적으로 이루어지기 때문에 장치 가열을 위한 막대한 에너지가 추가로 필요하다. 따라서 열처리재의 경제성 확보와 경쟁력 제고를 위해서는 건조 공정 및 열처리 공정의 시간과 에너지 사용량을 줄이기 위한 연구가 필요하다.

최근 과열증기를 이용하여 목재의 건조와 열처리가 동시에 이루어지는 lab scale 공정이 개발되었다(박 등 2012; 박, 2012; Park and Yeo, 2012; Park *et al.*, 2014). 과열증기는 끓는점 이상의 온도를 갖는 증기를 말하며 1900년 대 중반부터 식품이나 슬러지 등의 건조에 이용되어왔다. 과열증기 건조는 에너지 효율이 높고, 건조 속도가 빠르며 화재의 위험성이 적고, 다른 건조 공정과의 조합이 쉬운 등 다양한 장점을 갖고 있다. 특히, 고온/고압의 과열증기에서는 건조와 열처리가 동시에 이루어질 수 있다. 하지만 현재까지의 연구 결과는 lab scale 수준으로 산업적으로 이용하기에는 연구가 부족한 실정이다.

이에 본 장에서는 pilot scale 과열증기 목재 열처리 장치를 설계/제작한 다음, 이를 이용하여 낙엽송 생재 판재를 건조할 때 할렬이 발생하지 않는 과열증기의 온도와 압력 조건 및 건조 시간과 냉각 시간 등 과열증기 건조-열처리 공정을 제어할 수 있는 인자들의 조건을 결정하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시 수종

본 연구에서는 낙엽송(*Larix kaempferi*)을 공시수종으로 사용하였다. 낙엽송은 현재 국내 인공림 입목량이 가장 많은 수종으로서(Figure I-1) 국내에서 열처리재 생산에 많이 이용되고 있기 때문에 열처리 특성과 변화에 대한 이론적 연구가 필요한 수종이다. 특히, 낙엽송은 조/만재의 이행이 급하기 때문에 연륜이 뚜렷하고, 방사가도관이 발달되어 있어 연륜이나 방사조직을 따라서 할렬이 발생하는 건조나 열처리에 의한 결함이 발생할 가능성이 매우 높다(Figure II-2).

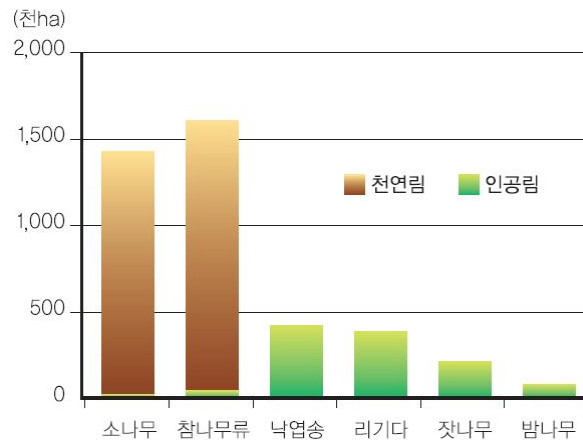


Figure II-1. Species distribution in Korea
(Korea Forest Service, 2011.)

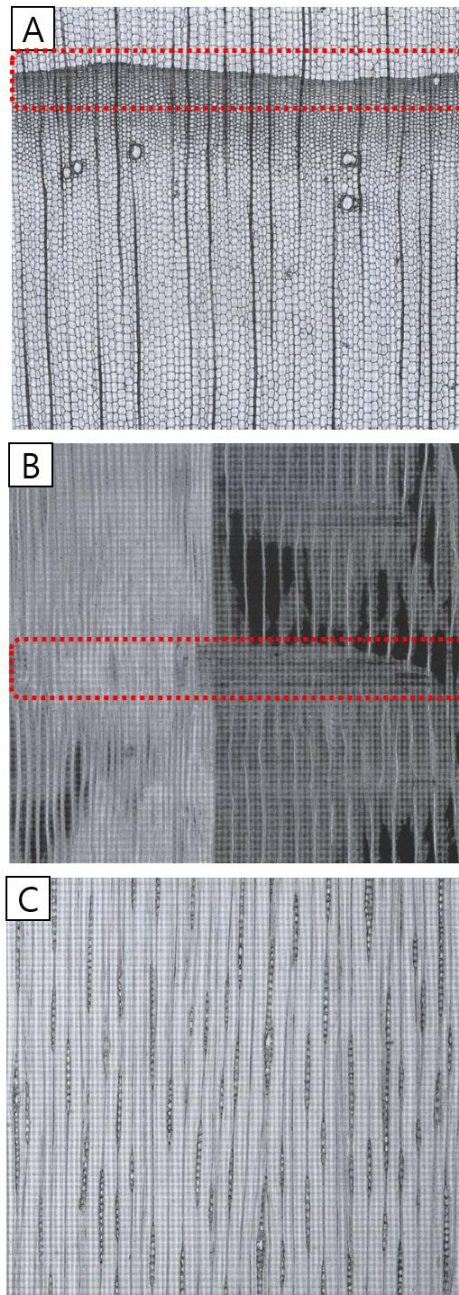


Figure II-2. Microscopic image of Japanese larch (Eom, 2015)

A : Cross section, B : Radial section, C : Tangential section

과열증기 건조-열처리 공정 제어 조건 결정을 위해 폭 150 mm, 두께 50 mm, 길이 2.7 m 크기의 낙엽송을 준비하였다. 가운데 2 m를 건조-열처리 시편으로 사용하였고, 건조-열처리 시편의 양쪽 20 mm는 초기함수율 측정용 시편으로 사용하였다(Figure II-3). 건조-열처리에 사용된 낙엽송 판재의 초기함수율은 약 40%였다.

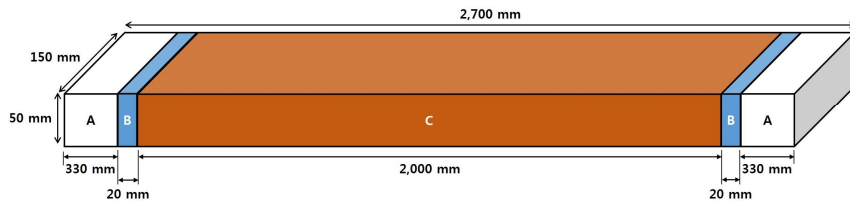


Figure II-3. Larch lumber specimen for drying and heat treatment using superheated steam

A. Removed pieces (330 mm)

B. Specimens to measure initial moisture content (20 mm)

C. Drying and heat-treatment specimen (2 m)

2.2. 과열증기 목재 열처리 장치

과열증기 건조-열처리 공정을 수행하기 위해서는 공정 중 과열증기의 온도와 압력을 목표 조건에 맞게 유지하는 것이 중요하다. 이를 위하여 Pilot scale의 과열증기 목재 열처리 장치를 설계/제작하였다. 장치는 반응기, 응축기, 피드탱크 및 진공펌프로 구성되어 있다(Figure II-4).

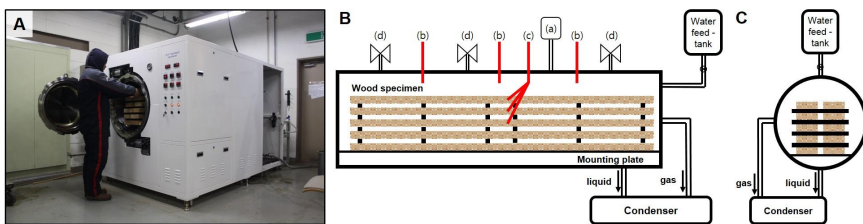


Figure II-4. Wood heat treatment equipment using superheated steam
(Park *et al.*, 2016)

- A. Overall view of the equipment
- B. Side view of the equipment
 - (a) Pressure sensor for the steam
 - (b) Fixed temperature sensors for the steam
 - (c) Non-fixed temperature sensors for the wood
 - (d) Pressure control valves (regulators)
- C. Front view of the equipment

2.2.1. 반응기 (Reactor)

반응기는 지름 0.64 m, 길이 2.2 m인 원통형으로 부피는 0.7 m³이다. 반응기의 내표면은 히터로 둘러싸여있어 반응기 내부를 가열할 수 있고, 반응기의 외표면은 단열재로 둘러싸여있어 반응기 내부의 열이 외부로 손실되는 것을 최소화하였다. 반응기에는 반응기 내부 증기의 온도를 측정할 수 있는 고정형 온도 센서(K-type thermocouple, Fluke, WA, USA) 3개와 목재 내부의 온도를 측정할 수 있는 비고정형 온도 센서 3개가 부착되어있어 공정 중 반응기 내부 증기와 목재 내부 온도를 측정할 수 있다. 또한 반응기 내부 증기의 압력을 측정할 수 있는 압력 센서(PA21SR, Keller, NC, USA)가 부착되어 있어 공정 중 반응기 내부 증기의 압력을 측정할 수 있다. 측정된 온도와 압력은 자료수집장치(CR-1000, Campbell scientific, UT, USA)를 통해 연결된 컴퓨터에 실시간으로 저장된다. 반응기 상단에는 안정적인 공정의 운용과 사용자의 안전을 도모하기 위하여 3개의 압력 조절 밸브(Regulator)가 설치되어 있다. 첫 번째 밸브는 목표 압력 값으로 설정하여 반응기 내부 압력이 목표 압력 이상이 되면 과량의 수증기를 응축기로 배출시키는 역할을 한다. 두 번째 밸브는 1차 안전밸브(safety valve)로 첫 번째 밸브가 작동되지 않거나 첫 번째 밸브만으로 압력 유지가 어려울 경우를 대비하여 목표 압력보다 약간 높은 값으로 설정한다. 두 번째 밸브에 의해 배출되는 증기도 응축기로 배출된다. 세 번째 밸브는 2차 안전밸브로 반응기의 설계 압력으로 설정되어 있어 내부 압력이 반응기의 설계 압력(1.0 MPa) 이상으로 상승할 경우 작동하며 매우 빠른 속도로 반응기 내부의 증기를 외부로 배출시킨다.

2.2.2. 응축기 (Condenser)

기체 및 액체 추출물을 포집·응축·회수하기 위하여 설치된 응축기는 0.04 m³의 부피의 원통형으로 반응기 아래쪽에 위치하여 반응기의 기체 및 액체 배출구와 관으로 연결되어있다. 응축기에 포집된 기체 추출물과 증기는 응축기 내부 코일의 냉각수에 의해 응축되고, 배출구를 통해 회수된다.

2.2.3. 증류수 피드탱크 (Water feed-tank)

피드탱크는 반응기 내로 증류수를 투입하기 위해 설치되었다. 피드탱크는 반응기와 관으로 연결되어있고, 펌프를 이용하여 반응기 내부로 증류수를 투입할 수 있다.

2.2.4. 진공펌프 (Vacuum pump)

진공펌프는 반응기 내 공기를 제거하기 위해 설치되었다. 진공펌프는 반응기 상부의 노출관과 연결되어 있다. 진공 펌프의 성능은 5×10^{-4} torr ($=6 \times 10^{-8}$ MPa)이고, 유속은 30 m³/h로 약 90초의 시간 안에 반응기 내부 압력은 0.01 MPa 이하가 된다.

2.2.5. 원격 제어 시스템

과열증기를 이용한 목재 건조-열처리 공정은 고온·고압의 과열증기를 이용하기 때문에 과열증기 목재 열처리 장치는 고압을 견딜 수 있도록 제작되었으며, 반응기 내부 압력을 안전하게 유지할 수 있는 압력 조절 밸브를 설치하였다. 또한 반응기 내부 고온의 열이 외부로 유출되는 것을 막기 위해 단열재로 마감하였다. 하지만 장치 운용 중 사용자의 안전을 도모하기 위한 추가 장치로 원격 제어 시스템을 구축하여 과열증기 건조-열처리의 시작과 종료를 원격으로 제어할 수 있도록 하였다. Figure II-5는 원격 제어 프로그램(CIMON-X, Cimon, Seongnam, Korea)의 제어화면이다. 제어 프로그램을 통해 증기의 목표 온도와 목표 압력 및 공정 스케줄을 입력한 다음, 공정을 시작하면 입력한 스케줄에 의해 증기의 목표 압력과 목표 온도를 유지하면서 공정이 진행되고, 설정된 시간이 지난 후에는 히터가 작동을 멈추게 된다. 또한 진공펌프의 작동과 종료도 제어 프로그램을 통해 가능하기 때문에 목재 시편을 투입한 후에는 사용자가 장치 주변으로 접근할 필요가 없어 사용자의 안전을 보장할 수 있다.

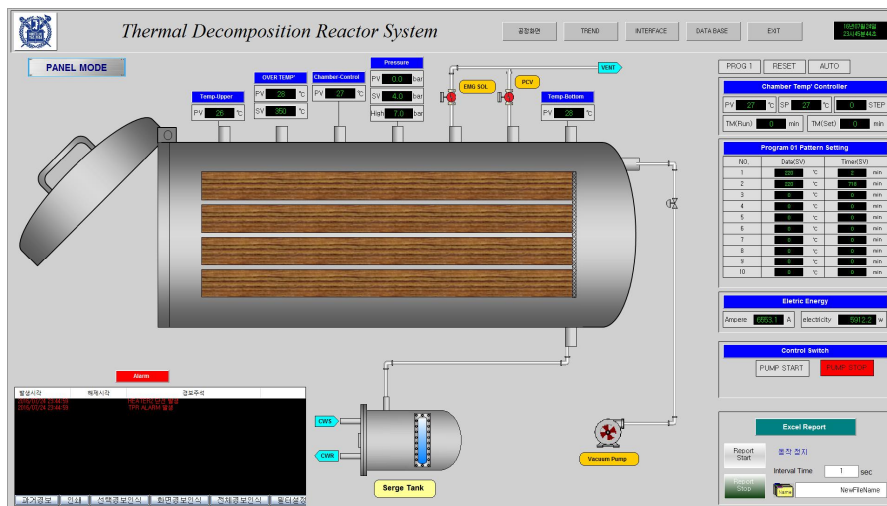


Figure II-5. CIMON-X program installed on the computer connected with wood heat treatment equipment using superheated steam

2.3. 낙엽송 판재 무할렬 건조-열처리를 위한 과열증기 조건 결정

낙엽송 판재를 할렬 발생 없이 건조-열처리하기 위한 과열증기 조건을 결정하기 위하여 Park *et al.*(2014)의 Lab scale 연구 결과에 따라 0.5 MPa의 압력과 220℃의 온도 조건인 과열증기를 기준으로 하여 온도, 압력, 공정 시간 및 냉각 속도를 변화시키면서 할렬 발생 유무를 평가하였다.

과열증기 건조-열처리 공정은 다음의 순서에 따른다. 먼저 반응기 내에 건조-열처리할 목재 시편을 투입한 다음 반응기의 뚜껑을 덮어 반응기를 밀폐시킨 후, 반응기 내부에 일정량의 수분을 투입한다. 이때, 투입할 수분의 양은 과열증기의 목표 압력과 목표 온도 및 반응기의 부피에 따라 결정된다. 예를 들어 과열증기 목표 압력이 0.5 MPa, 목표 온도가 250℃이고, 반응기의 부피가 0.7 m³일 경우, 목표 조건에서 과열증기의 비체적은 0.47 m³/kg이므로(노, 2008) 투입할 증류수의 최소량은 약 1.49 kg이 된다. 하지만 공정초기에 빠른 열전달을 위해 최소량보다 1.5~2배의 증류수를 투입해야 한다. 다음으로 진공펌프를 이용해 반응기 내부 공기를 제거하여 반응기 내부 압력이 0.01 MPa 이하가 되게 한다. 과열증기 목재 건조-열처리 공정에서는 과열증기가 열을 목재로 전달하는 열전달 매개체이자 동시에 수분을 분산시키는 물질전달 매개체이다. 이때, 반응기 내 공기는 목재 건조에 방해 요소로 작용한다. 히터를 작동시키면 증류수가 증발하면서 반응기 내 압력과 온도가 상승한다. 목재로부터 증발되어 나온 수증기에 의해 반응기 내부가 목표 압력을 초과하면 압력 조절 밸브에 의해 과량의 수증기가 응축기로 배출되면서 반응기 내부는 목표 압력을 유지하게 된다. 또한, 반응기 내부 증기의 온도가 목표 온도에 도달하면 히터가 작동을 멈추고, 증기의 온도가 목표 온도 이하로 떨어지면 다시 히터가 작동하는 히터의 On/off 시스템에 의해 공정 중 증기의 온도가 유지된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도 변화에 따른 건조 결함 평가

Figure II-6은 Park *et al.*(2014)의 lab scale 연구 결과와 동일한 과열증기 조건인 0.5 MPa, 220°C에서 반응기의 부피가 커짐을 고려하여 공정 시간을 24시간으로 설정한 과열증기 건조-열처리 공정 중 반응기 내 증기와 목재 내부 온도 변화 및 반응기 내부 증기의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. Lab scale 목재 열처리 장치를 이용하여 건조-열처리한 경우보다 반응기 내부 증기의 압력과 온도가 증가하는 속도 및 목재의 온도가 증가하는 속도가 느리게 나타났다. 목재의 온도가 0.5 MPa에서 수증기의 포화온도인 약 150°C에서 일정하게 유지되는 구간이 목재 내 수분이 제거되는 구간이고, 목재의 온도가 다시 상승하는 시점이 목재가 평형습수율에 도달하는 시점임을 고려하면, 목재 내 수분이 제거되는 데까지 18시간이 소요된 것으로 나타났다. 이는 반응기의 크기가 커짐에 따라 반응기 중심까지 열이 전달되는 데 오랜 시간이 걸리기 때문인 것으로 생각되었다. 공정이 종료되는 시점에서 목재의 온도가 목표 온도인 200°C에 도달하지 못 하였으므로 증기의 목표 온도를 lab scale 연구 결과보다 높게 설정해야할 것으로 생각되었다.

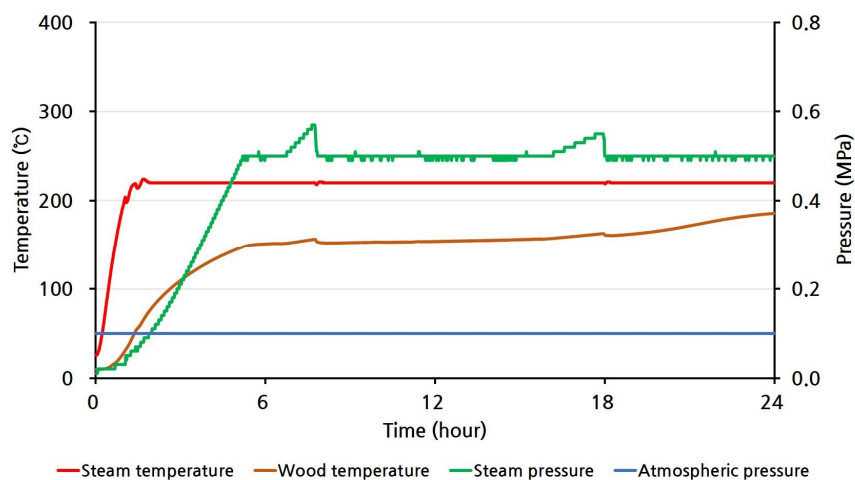


Figure II-6. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 24 hours



Figure II-7. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 24 hours

Figure II-8은 0.5 MPa의 과열증기 압력에서 과열증기 온도를 250℃로 변화시켜서 18시간 동안 낙엽송 판재를 건조-열처리하는 동안 반응기 내부 증기와 목재의 온도 변화 및 반응기 내부 증기의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 과열증기의 목표 온도를 높임으로써 목재의 온도가 약 150℃에서 일정하게 유지되기 시작하는 시점이 약 2시간 정도 단축되었고, 목재가 평형함수율에 도달하는 시간도 단축시킬 수 있었다. 목재는 160℃ 이상의 온도에 약 10시간 동안 노출되었고, 공정이 시작된 후 약 16시간 만에 220℃에 도달하였다. 과열증기 목표 온도를 높인 조건에서 건조-열처리된 판재는 내부 할렬이 거의 발생하지 않았다(Figure II-9).

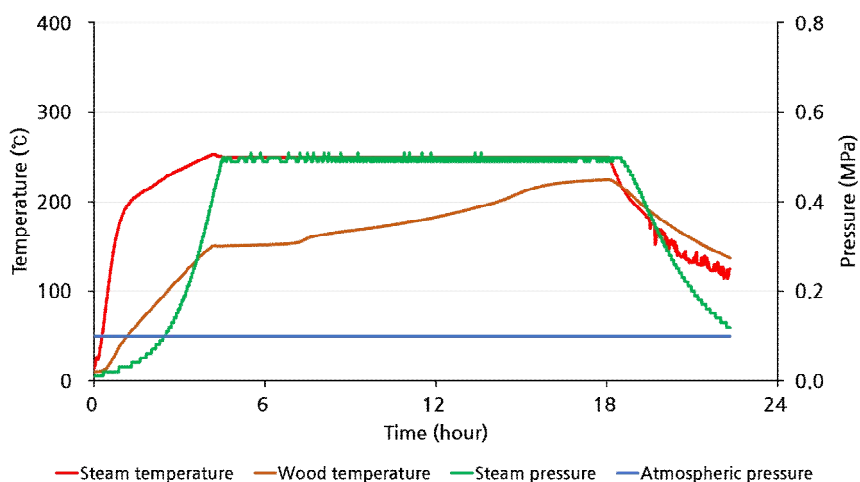


Figure II-8. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 18 hours



Figure II-9. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 18 hours

Figure II-10은 0.5 MPa의 압력과 220℃의 온도 조건의 과열증기에서 18시간 동안 낙엽송 판재를 건조-열처리하는 동안 반응기 내부 증기와 목재의 온도 변화 및 반응기 내부 증기의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 과열증기의 온도가 낮아짐에 따라서 공정 중 목재의 최고 온도는 약 170℃였다. 목재가 160℃ 이상에서 유지되는 시간은 약 10시간이었지만 고온에 노출된 시간이 감소함에 따라 목재에 할렬과 같은 결함은 거의 발생하지 않았다(Figure II-11).

과열증기 목재 건조-열처리 공정에서 과열증기의 온도는 공정초기 반응기 내부 증기의 온도와 압력 상승 속도를 결정할 뿐만 아니라 건조-열처리재의 물성을 결정하는 중요한 요소이므로 처리재의 용도에 따라 온도 설정이 필요할 것이다.



Figure II-10. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 18 hours



Figure II-11. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 220°C for 18 hours

3.2. 압력 변화에 따른 건조 결함 평가

Figure II-12는 과열증기 조건을 0.7 MPa의 압력과 250°C의 온도에서 낙엽송 판재를 18시간 동안 건조-열처리 하는 동안 반응기 내부 증기와 목재의 온도 변화 및 반응기 내부 증기의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 목표 압력이 높아짐에 따라 목재 내 수분이 제거되는 동안 목재의 온도는 0.7 MPa에서 수증기의 포화온도인 약 165°C로 유지되었다. 즉, 목재 내 수분이 제거되는 동안에도 목재는 160°C 이상에 노출되어 있게 되고, 고온에서 장시간 열처리됨에 따라 심각한 수준의 내부 할렬이 발생한 것을 확인할 수 있었다(Figure II-13). 목재의 내부 할렬은 강도적 성능의 감소를 야기하는 등 이용가치가 현저하게 떨어진다. 이때, 전체 건조-열처리 공정 시간을 줄임으로써 목재가 고온에 노출되는 시간을 줄일 수 있겠지만 공정 시간이 감소됨에 따라 목재 내에 수분이 잔존함으로써 건조 효과를 볼 수 없게 된다. 따라서 할렬이 발생하지 않도록 낙엽송 판재를 건조하기 위한 적정 과열증기 압력은 0.5 MPa인 것으로 생각된다.

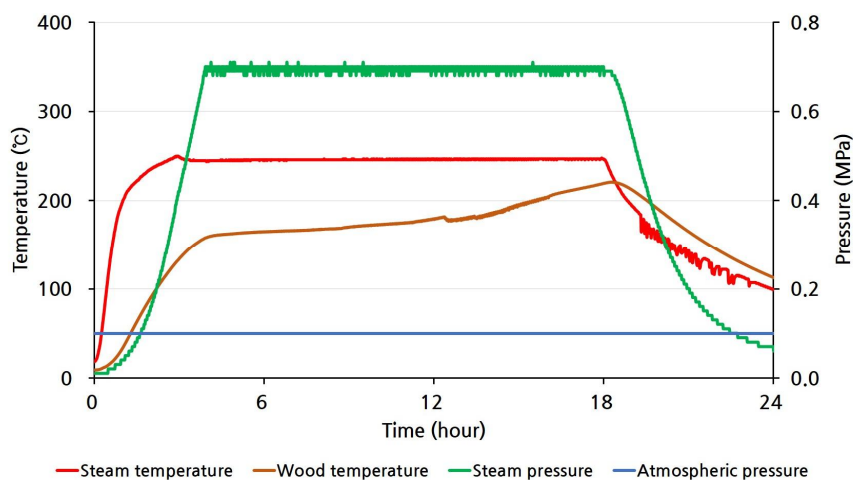


Figure II-12. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.7 MPa and 250°C for 18 hours



Figure II-13. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.7 MPa and 250°C for 18 hours

3.3. 처리 시간 변화에 따른 건조 결함 평가

그림 II-14는 0.5 MPa의 압력과 250°C의 온도에서 12시간 동안 낙엽송 판재를 과열증기 건조-열처리할 때 반응기 내 증기와 목재의 온도 변화 및 반응기 내 증기의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 공정초기에 증기의 압력과 온도 변화는 같은 조건에서 18시간 동안 건조-열처리한 경우와 같은 경향을 보였다. 공정이 종료되는 시점까지 약 8시간 동안 목재는 160°C 이상의 온도에서 노출되었으며, 목재의 최고 온도는 약 200°C였다. 목재가 고온에 노출되는 시간이 짧았기 때문에 건조-열처리재에서 건조 결함은 거의 발생하지 않았다(Figure II-15). 온도와 함께 처리 시간은 처리재의 물성을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 처리 시간 역시 처리재의 이용 목적에 따라 결정해야 한다.

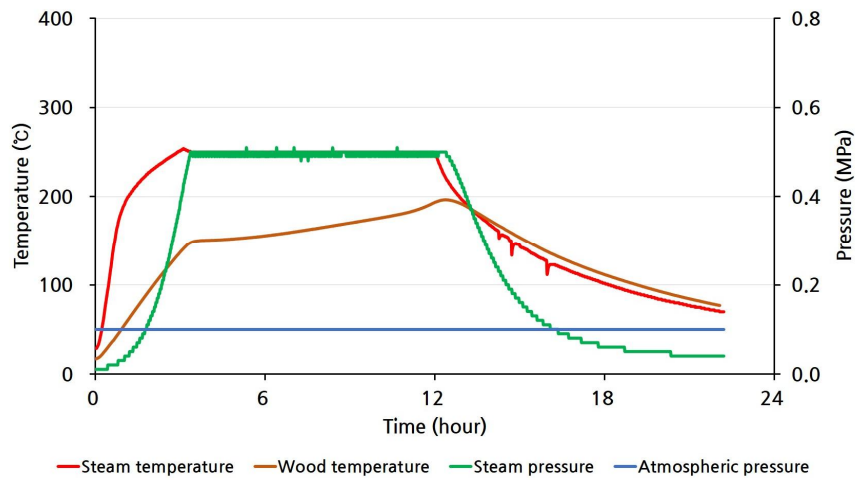


Figure II-14. Changes of steam temperature, wood temperature, and steam pressure during drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 12 hours



Figure II-15. Larch lumbers after drying and heat treatment using superheated steam of 0.5 MPa and 250°C for 12 hours

3.4. 냉각 속도(온도)에 따른 건조 결함 평가

200℃ 이상의 고온에서 목재를 건조-열처리한 후 냉각 속도에 따라 발생하는 건조 결함을 확인하기 위하여 건조-열처리된 목재를 저온, 상온, 고온에서 냉각시키면서 할렬 발생 유무를 평가하였다. 저온 조건은 과열증기 건조-열처리가 종료된 후 처리재를 4℃로 유지되는 저온 냉장창고에서, 상온 조건은 과열증기 건조-열처리가 종료된 후 처리재를 과열증기 목재 열처리 장치가 설치된 서울대학교 200동 임산가공공장 실내(10~20℃)에서, 고온 조건은 과열증기 건조-열처리가 종료된 후 처리재를 반응기 내에서 증기 응축과 함께 서서히 냉각시키는 방법으로 설정하였다. 0.5 MPa의 압력과 220℃의 온도 조건에서 18시간 동안 과열증기 건조-열처리된 낙엽송 판재를 저온 및 상온 조건에서 냉각시킨 경우 목재가 급속히 냉각되면서 목재 중심과 표면의 온도 차이가 크게 발생하면서 표면에 할렬이 발생하였다(Figure II-16). 따라서 과열증기 건조-열처리 공정이 끝난 후 시편을 반응기 내에서 증기의 응축과 함께 서서히 냉각시켜야 할 것이다.

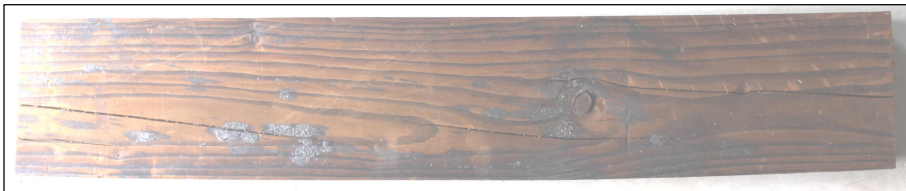


Figure II-16. Check occurrence on the surface of larch lumber cooled at room temperature

4. 결론

본 장에서는 과열증기를 이용하여 폭 150 mm, 두께 50 mm, 길이 2 m 크기의 낙엽송 생재 판재를 건조-열처리할 때 할렬이 발생하지 않는 과열증기 건조-열처리 공정 제어 조건을 결정하고자 하였다. 이를 위하여 Pilot scale의 과열증기 목재 열처리 장치를 설계/제작하였다. 제작된 과열증기 목재 열처리 장치를 이용하여 기존 lab scale 연구 결과에서 도출된 과열증기 건조-열처리 조건을 바탕으로 온도, 압력, 처리 시간 및 냉각 속도를 변화시키면서 건조 결함 발생 유무를 평가하였다. 과열증기의 온도와 공정 시간은 과열증기 건조-열처리된 목재의 물성과 밀접한 관련이 있기 때문에 건조 결함이 발생하지 않는 범위 내에서 처리재의 이용 목적에 따라 결정해야 한다. 열전달 속도와 끓는점 등을 고려하여 과열증기의 압력은 0.5 MPa이 가장 적절한 것으로 생각된다. 또한, 급격한 온도 저하에 따른 건조 결함 발생을 방지하기 위하여 과열증기 건조-열처리 공정이 종료된 후 처리재는 반응기 내에서 증기의 응축과 함께 서서히 건조시켜야 할 것으로 생각된다.

제 3 장

과열증기를 이용한 낙엽송 판재 건조-열처리 공정의 에너지 효율 평가

1. 서론

끓는점 이상의 온도를 갖는 과열증기는 건조와 열처리에 모두 이용될 수 있는 열전달 매개체이다(김 등, 2008). 과열증기를 이용한 건조 기술은 공정에서 사용된 고온의 증기를 재활용하면 에너지 효율이 높아지고, 산소가 없는 조건에서 건조나 열처리가 이루어지기 때문에 산화나 화재의 위험성이 없으며, 열전달 속도가 빠르기 때문에 건조 시간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있기 때문에 식품이나 펄프, 하수 슬러지와 목재 등의 건조 산업에 널리 이용되고 있다(Pang, 1997; Pang and Dakin, 1999; Pang and Pearson, 2004; Defo *et al.*, 2004; Cheng *et al.*, 2004; Haque and Sargent, 2008; 김 등, 2008) 특히, 최근에는 과열증기를 이용하여 생재를 건조하면서 동시에 열처리하는 과열증기 건조-열처리 복합 공정(combined treatment of drying and heat-treatment)에 대한 연구가 수행된 바 있다(Park and Yeo, 2012; Park *et al.*, 2014; 박 등, 2016; Park *et al.*, 2017). 적절한 과열증기 조건에서 건조-열처리된 목재는 평형함수율이 감소함에 따라 수축률이 감소하고, 종압축강도가 증가하며, 부후균에 대한 저항성이 증가하였다(Park *et al.*, 2014). 과열증기 건조-열처리 복합 공정은 하나의 밀폐된 장치에서 건조와 열처리가 동시에 수행되는 반면에 관행 열기 열처리는 열기 건조와 열기 열처리가 서로 다른 장치에서 개별적인 공정으로 이루어진다. 따라서 과열증기 건조-열처리 복합 공정은 관행 열처리 공정과 비교하여 장치를 재가열할 필요가 없고, 열전달 매개체의 유출에 의한 에너지 손실이 적다.

본 장에서는 과열증기를 이용한 낙엽송 생재 판재 건조-열처리 공정의 이론적인 소요 열에너지를 평가하고, 실제 사용된 에너지량을 측정하여 에너지 손실량과 에너지 효율을 계산하고자 한다. 또한 이를 열기 건조 후 열기 열처리하는 관행 열처리 공정의 결과와 비교하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 과열증기 건조-열처리

이론적 소요 열에너지 및 에너지 효율을 평가하기 위한 과열증기 건조-열처리 공정은 제2장에서 시험한 공정 중 0.5 MPa, 250°C 과열증기 조건에서 18시간 동안 히터를 가동한 공정을 적용하였다.

반응기 내부에는 폭 150 mm, 두께 50 mm, 길이 2 m인 생재 상태의 낙엽송 판재 10개, 즉 0.15 m³의 낙엽송 판재가 투입되었다. 투입한 판재들의 평균 초기함수율은 약 43.07% ($\pm 5.00\%$)였고, 전체 목재의 예상 전건 무게의 합은 79.53 kg이었다.

2.2. 열기 건조 후 열기 열처리

과열증기 건조-열처리 공정의 이론적 소요에너지, 실제 소요 전력량 및 에너지 효율에 대한 대조군으로써 열기 건조된 낙엽송 판재를 열기 열처리하는 공정을 적용하였다.

2.2.1. 열기 건조

열기 건조는 미국 농무성 산림청 산하 임산물 연구소(Forest products laboratory, FPL)에서 개발한 FPL 열기 건조 스케줄(Table Ⅲ-1)에 따라 수행되었다. 건조기 내부에는 폭 150 mm, 두께 50 mm, 길이 1 m 인 생재 상태의 낙엽송 판재 20개를 투입하여 건조재의 부피가 과열증기 건조-열처리의 경우와 같은 0.15 m³이 되게 하였다. 낙엽송 생재 판재의 초기 함수율은 약 40.73% ($\pm 4.82\%$)였고, 약 7일 간의 열기 건조 후 평균 최종 함수율은 10.08% ($\pm 2.54\%$)였다. 투입한 낙엽송 판재의 예상 전건 무게의 합은 86.77 kg 이었다.

Table Ⅲ-1. FPL kiln drying schedule for larch lumber with 50 mm thickness (T10-C4S).

MC ^a (%)		Dry bulb (°C)	Wet bulb (°C)	RH ^b (%)
Green	~ 40	60.0	56.0	82.0
40	~ 35	60.0	54.5	75.0
35	~ 30	60.0	49.0	64.0
30	~ 25	65.0	51.0	57.0
25	~ 20	70.0	53.0	50.0
20	~ 15	75.0	55.0	45.0
15	~ End	80.0	52.0	25.0

MC^a : Moisture content, RH^b : Relative humidity

2.2.2. 열기 열처리

열기 열처리는 과열증기 건조-열처리와 동일한 장치를 이용하여 수행되었다. 히터 가동 시간은 총 18시간이었으며, 열기 열처리가 수행되는 동안 반응기 내부 압력은 대기압인 0.1 MPa로 유지되도록 하였고, 열기의 목표 온도는 250℃였다. 목재로부터 제거된 수증기와 열팽창에 의한 열기는 압력 조절 밸브를 통해 응축기로 배출되었다.

Figure III-1은 18시간 동안 0.1 MPa, 250℃ 조건의 열기 열처리 공정 중 공기와 목재의 온도 및 공기의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 공정이 시작되면서 반응기 내부 공기의 온도는 빠르게 목표 온도인 250℃까지 상승했다. 목재의 온도는 증기의 온도 상승에 따라 약 240℃까지 상승하였다. 반응기 내부 공기는 대기압인 0.1 MPa로 유지되었다. 열기 열처리 후 목재의 함수율은 0%였다.

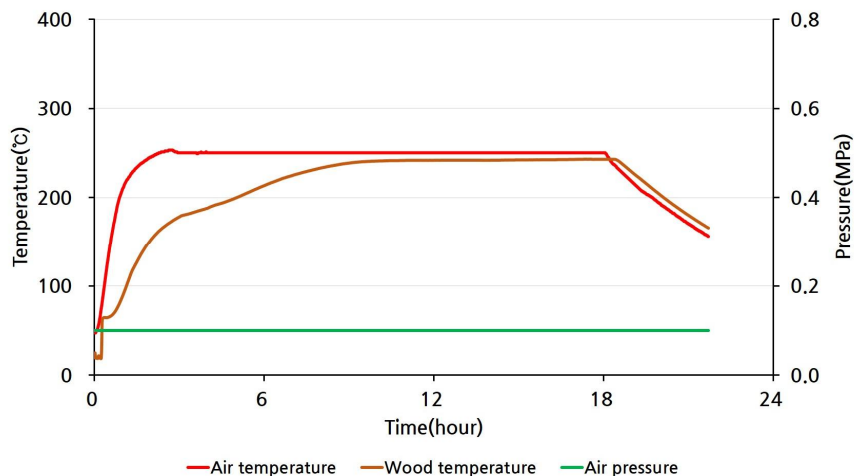


Figure III-1. Changes of air temperature, wood temperature, and air pressure during hot-air heat treatment at 0.1 MPa and 250℃ for 18 hours

2.3. 이론적 소요 열에너지의 구분

열기 건조 또는 열처리에 사용되는 에너지 사용량을 분석하고 에너지 효율을 평가하기 위해서는 각각의 열에너지가 어떻게 사용되는지 적절하게 구분하는 것이 필요하다. 정 등(2008)은 목재를 건조할 때 필요한 열 요구인자를 여섯 가지 열에너지로 나누어 분석하였다. 이를 바탕으로 과열증기 건조-열처리 공정 및 열기 열처리 공정의 이론적인 소요 열에너지를 목질의 온도 상승을 위한 열에너지(H_1), 흡습력 극복을 위한 열에너지(H_2), 목재 내 잔존 수분의 가열을 위한 열에너지(H_3), 목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지(H_4), 목표 조건의 과열증기를 생성하기 위한 열에너지(H_{5ss}), 반응기 내 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_{5ha}) 및 반응기 외부에서 유입되는 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_6) 등의 여섯 가지 열에너지로 구분하였고, 과열증기 건조-열처리 공정과 관행 열기 열처리 공정의 이론적 소요 열에너지를 평가하였다.

2.3.1. 목재의 온도 상승을 위한 열에너지 (H_1)

$$H_1 = W_0 \cdot c_{wood} \cdot (T_{wf} - T_{wi}) \quad (\text{Eq. III - 1})$$

$$c_{wood} = 0.268 + 0.00055 \cdot (T_{wi} + T_{wf}) \quad (\text{Eq. III - 2})$$

여기에서 W_0 는 목재의 전건 무게(kg), c_{wood} 는 목재의 비열(kJ/kg°C), T_{wi} 는 건조 또는 열처리 전 목재의 초기 온도(°C), T_{wf} 는 건조 또는 열처리 후 목재의 최종 온도(°C)를 의미한다.

2.3.2. 흡습력 극복을 위한 열에너지 (H_2)

$$H_2 = W_0 \cdot H_{de} \quad (\text{Eq. III - 3})$$

$$H_{de} = 10^{1.2355 - 5.408MC_f} \quad (\text{Eq. III - 4})$$

여기에서, H_{de} 는 목재의 단위 무게 당 탈착열(kJ/kg), MC_f 은 목재의 최종 함수율(분율)을 의미한다.

2.3.3. 목재 내 잔존 수분의 가열을 위한 열에너지 (H_3)

$$H_3 = W_0 \cdot MC_f \cdot (T_{wf} - T_{wi}) \cdot c_{water} \quad (\text{Eq. III - 5})$$

여기에서, c_{water} 는 물의 비열(=4.19 kJ/kg°C)을 의미한다.

2.3.4. 목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지 (H_4)

$$H_4 = W_0 \cdot \Delta MC \cdot ((T_{af} - T_{\infty}) \cdot c_{water} + h_{water}) \quad (\text{Eq. III - 6})$$

$$h_{water} = 598.25 - 0.6 \cdot T_{wf} \quad (\text{Eq. III - 7})$$

여기에서, ΔMC 는 건조 또는 열처리 전후 목재의 함수율 변화(분율), T_{af} 는 건조 또는 열처리 공정 중 반응기 내 공기 또는 증기의 최종 온도(°C), T_{∞} 는 반응기 주변 공기의 온도(°C), h_{water} 는 물의 증발잠열(kJ/kg)을 의미한다.

2.3.5. 목표 조건의 과열증기를 생성하기 위한 열에너지(H_{5ss})

과열증기를 생성하기 위한 열에너지는 물의 상변화에 따른 엔탈피 변화를 통해 계산될 수 있다. 즉, 건조-열처리 공정을 시작할 때 투입한 증류수의 엔탈피와 과열증기의 목표 압력과 목표 온도 조건에서 엔탈피의 차이를 통해 계산될 수 있다. 반응기에 투입된 증류수가 과열증기가 되는 과정은 ‘증류수의 가열’, ‘수증기로 상변환’ 및 ‘과열증기로 상태 변화’의 세 가지 과정으로 구분되고, 각 과정에서 소요되는 열에너지와 엔탈피의 차이를 통해 과열증기를 생성하기 위한 열에너지를 계산하였다.

2.3.6. 반응기 내 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_{5ha})

$$H_{5ha} = c_{air} \cdot m_{air} \cdot (T_{af} - T_{ai}) \quad (\text{Eq. III - 8})$$

여기에서 c_{air} 는 반응기 내 공기의 비열(=1.00 kJ/kg°C), m_{air} 는 반응기 내 공기의 질량(kg), T_{ai} 는 열기 열처리 전 반응기 내 공기의 초기 온도(°C), T_{af} 는 열기 열처리 중 반응기 내 공기의 최고 온도(°C)를 의미한다.

2.3.7. 반응기 외부에서 유입되는 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_6)

목재로부터 제거된 수분은 반응기 내에서 수증기 상태로 순환하게 된다. 따라서 반응기 내 수증기는 응축되어 반응기 외부로 배출되어야 하고, 배출된 수증기의 부피만큼 반응기 외부에서 새로운 공기가 유입되어야 섬유포화점 이하로 목재가 건조된다. 반응기 외부에서 유입되는 새로운 공기는 건조 또는 열처리 조건의 온도까지 가열되어야 한다. 또한, 새로 유입되는 공기에는 일정량의 수증기가 포함되어있기 때문에 이 수증기를 가열하기 위한 에너지가 추가로 필요하다. 따라서 반응기 외부에서 유입되는 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지는 반응기 외부에서 유입되는 건조한 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_{6da})와 반응기 외부에서 유입되는 수증기를 가열하는데 필요한 열에너지(H_{6uv})로 구분하여 계산되어야 한다.

$$H_{6da} = W_0 \cdot c_{air} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta MC_i \cdot (T_{af} - T_{ai})}{G_i - G_0} \quad (\text{Eq. III-9})$$

$$H_{6wv} = W_0 \cdot c_{vapor} \cdot G_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta MC_i \cdot (T_{af} - T_{ai})}{G_i - G_0} \quad (\text{Eq. III-10})$$

여기에서 i 는 건조 또는 열처리에서 온도와 상대습도 등의 조건이 변화되는 단계, G_i 는 각 단계에서 반응기 내 공기의 비습도($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{air}}$), G_0 는 반응기 외부에서 유입되는 공기의 비습도($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{air}}$), c_{vapor} 는 반응기 내 수증기의 비열($=1.88 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)을 의미한다.

2.3.8. 이론적 소요 열에너지의 총합

과열증기를 이용한 낙엽송 판재 건조-열처리 공정의 이론적 소요 열에너지의 총합(H_{SHS}), 열기 건조재 열기 열처리 공정의 이론적 소요 열에너지의 총합(H_{HA}) 및 낙엽송 판재의 열기 건조 공정의 이론적 소요 열에너지의 총합(H_{KD})은 각각 Eq. III-11, III-12 및 III-13으로 정의하였다.

$$H_{SHS} = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_{5ss} \quad (\text{Eq. III-11})$$

$$H_{HA} = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_{5ha} \quad (\text{Eq. III-12})$$

$$H_{KD} = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_{5ha} + H_6 \quad (\text{Eq. III-13})$$

2.4. 에너지 손실 및 에너지 효율

과열증기 목재 건조-열처리, 열기 열처리 및 열기 건조 공정에서 실제로 사용된 전력량(P_{SHS} , P_{HA} , P_{KD})은 각각의 장치에 부착되어있는 전력량계를 통해 측정되었다. 각 공정에서 실제로 사용된 에너지는 여섯 가지 이론적 소요 열에너지뿐만 아니라 장치의 구성요소를 가열하고 유지하는 데 필요한 열에너지를 포함하고 있다. 즉, 공정에서 실제로 사용된 전력량에서 여섯 가지 이론적 소요 열에너지를 제외한 나머지는 에너지 손실량(Energy loss)으로 볼 수 있으며, 에너지 손실은 각 공정별로 Eq. Ⅲ-14, Ⅲ-15 및 Ⅲ-16에 따라 계산되었다.

$$\text{Energy loss}_{(SHS)} = H_{SHS} - P_{SHS} \quad (\text{Eq. Ⅲ-14})$$

$$\text{Energy loss}_{(HA)} = H_{HA} - P_{HA} \quad (\text{Eq. Ⅲ-15})$$

$$\text{Energy loss}_{(KD)} = H_{KD} - P_{KD} \quad (\text{Eq. Ⅲ-16})$$

또한, 에너지 효율(Energy efficiency)은 여섯 가지 이론적 소요 열에너지의 총합을 실제 사용된 전력량으로 나눈 값으로 정의할 수 있으며, 각 공정별로 Eq. Ⅲ-17, Ⅲ-18 및 Ⅲ-19에 따라 계산되었다.

$$\text{Energy efficiency}_{(\text{SHS})} (\%) = \frac{H_{\text{SHS}}}{P_{\text{SHS}}} \times 100 \quad (\text{Eq. Ⅲ-17})$$

$$\text{Energy efficiency}_{(\text{HA})} (\%) = \frac{H_{\text{HA}}}{P_{\text{HA}}} \times 100 \quad (\text{Eq. Ⅲ-18})$$

$$\text{Energy efficiency}_{(\text{KD})} (\%) = \frac{H_{\text{KD}}}{P_{\text{KD}}} \times 100 \quad (\text{Eq. Ⅲ-19})$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 이론적 소요 열에너지

Table Ⅲ-2는 건조와 열처리 공정 중 이론적 소요 열에너지를 계산하기 위해 필요한 온도와 함수율 등의 인자들을 측정한 결과와 각각의 이론적 소요 열에너지를 계산한 결과 그리고 실제 사용된 전력량과 에너지 효율 및 에너지 손실량을 계산한 결과를 정리한 표이다(Park *et al.*, 2017). 과열증기 건조-열처리는 건조와 열처리가 하나의 장치에서 동시에 진행되는 반면에 열기 건조 후 열기 열처리 공정은 서로 다른 장치에서 각각 진행되었기 때문에 두 공정의 이론적 소요 열에너지와 실제 사용된 전력량의 합을 이용하여 에너지 효율과 에너지 손실량을 계산하였다.

3.1.1. 목재의 온도 상승을 위한 열에너지 (H_1)

과열증기 건조-열처리 공정과 열기 열처리 공정에서 목재의 온도를 상승시키는 데 필요한 열에너지는 유사한 값을 나타내었지만, 열기 건조 후 열기 열처리 공정의 경우에는 건조 공정에서 목재를 가열했다가 상온으로 냉각된 목재를 다시 가열해야했기 때문에 열기 건조 공정에서 목재 온도 상승을 위한 이론적 소요 열에너지(8,560.91 kJ)가 추가로 필요한 것으로 나타났다.

3.1.2. 흡습력 극복을 위한 열에너지 (H_2)

두 공정에서 모두 비슷한 초기 함수율을 갖는 낙엽송 생재 판재가 사용되었고, 열처리 후 낙엽송 판재의 최종 함수율이 0이었기 때문에 두 공정에서의 흡습력 극복을 위한 이론적 소요 열에너지는 비슷하게 계산되었다.

3.1.3. 목재 내 잔존 수분의 가열을 위한 열에너지 (H_3)

열처리 후에 목재의 최종 함수율은 0이었다. 따라서 두 열처리 공정에서 목재 내에 잔존하는 수분의 가열을 위한 이론적 소요 열에너지는 0 kJ이었다. 하지만 열기 건조 후에 목재의 최종 함수율은 10.08%였기 때문에 잔존하는 수분의 가열을 위한 이론적 소요 열에너지는 2197.00 kJ로 나타났다.

3.1.4. 목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지 (H_4)

과열증기 건조-열처리 공정에서는 약 40%의 함수율에 해당하는 수분이 250℃의 온도까지 가열된 다음 증발되어 목재로부터 제거된다. 하지만 열기 건조 후 열기 열처리 공정에서는 약 30%의 함수율에 해당하는 수분은 열기 건조 공정에서 80℃의 온도까지 가열된 다음 증발되어 목재로부터 제거되고, 약 10%의 함수율에 해당하는 수분은 열기 열처리 공정에서 250℃의 온도까지 가열된 다음 증발되어 목재로부터 제거된다. 따라서 목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지는 과열증기 건조-열처리 공정(97,636.34 kJ)에서 열기 건조 후 열기 열처리 공정(73,908.53 kJ)보다 더 많이 필요한 것으로 나타났다.

3.1.5. 목표 조건의 과열증기를 생성하기 위한 열에너지(H_{5ss})

과열증기를 생성하는 데 필요한 열에너지는 공정이 시작될 때 투입한 20℃에서 4 kg의 물과 0.7 m³의 반응기를 가득 채우고 있는 0.5 MPa, 250℃의 과열증기 사이의 엔탈피 차이로 계산될 수 있다. 이 과정은 다시 ‘4 kg의 물이 20℃에서 100℃ 가열되는 과정’, ‘대기압(0.1 MPa)에서 100℃의 물이 100℃의 수증기로 증발하는 과정’, ‘0.1 MPa, 100℃의 수증기가 0.5 MPa, 250℃의 과열증기로 바뀌는 과정’으로 구분하여 계산될 수 있다.

먼저, 4 kg의 물이 20℃에서 100℃로 가열되는 과정은 물의 비열(4.19 kJ/kg℃)과 물의 질량(4 kg) 그리고 물의 온도 차이(80℃)의 곱을 통해 1,339.78 kJ로 계산되었다.

대기압에서 100℃의 물이 100℃의 수증기로 증발하는 과정은 물의 질량(4 kg)과 물의 증발잠열(h_{water})을 이용하여 9,014.18 kJ로 계산되었다.

대기압에서 100℃인 수증기와 0.5 MPa에서 250℃인 과열증기의 엔탈피는 각각 2,674.90 kJ/kg과 2,905.50 kJ/kg이다 (노, 2008). 이때, 공정 전 반응기에 투입한 증류수의 양은 4 kg이고, 공정이 종료된 시점에서 반응기 내에 남아 있는 과열증기의 양은 1.55 kg으로 공정 시작 시점에서 증류수의 양과 공정 종료 시점에서 증기의 양이 다르다. 이는 2.45 kg의 수분이 공정 중 반응기 내부 압력을 0.5 MPa로 유지하기 위해 반응기 밖으로 배출되었기 때문이다. 반응기 내부의 과량의 증기가 공정이 종료되는 시점까지 균일한 속도로 배출되는 것으로 가정하고, 공정이 시작될 때 투입한 증류수의 양(4 kg)과 공정이 종료된 시점에서 반응기 내에 남아 있는 과열증기의 양(1.55 kg)의 평균값(2.775 kg)과 두 조건에서의 엔탈피 차이(230.60 kJ/kg)를 이용해 대기압에서 100℃인 수증기가 0.5 MPa에서 250℃인 과열증기로 상변화하는 데 필요한 열에너지(640.42 kJ)를 계산하였다.

결과적으로 과열증기를 생성하는 데 필요한 열에너지는 세 가지 과정을 거치는 동안 필요한 열에너지의 합을 통해 10,994.37 kJ로 계산되었다.

3.1.6. 반응기 내 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지(H_{5ha})

열기 건조와 열기 열처리 공정이 진행되는 동안 반응기 내부 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지는 각각의 공정 전과 후 평균 온도에서 공기의 비열과 질량, 그리고 공정 전후 공기의 온도차의 곱을 통해 열기 건조에서는 84.65 kJ, 열기 열처리에서는 188.59 kJ로 계산되었다.

3.1.7. 반응기 외부에서 유입되는 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지 (H_6)

과열증기 목재 열처리 장치와 연결되어 있는 모든 관은 공기의 유동이 반응기에서 응축기 쪽으로 한쪽 방향으로만 진행되도록 설계되었기 때문에 외부 공기가 내부로 유입되는 것이 불가능하다. 따라서 과열증기 건조-열처리 공정과 열기 열처리 공정에서는 반응기 외부에서 유입되는 공기를 가열하는 데 필요한 열에너지가 0 kJ이다. 반면에 열기 건조 공정의 경우에는 외부 공기가 반응기 내로 유입될 수 있다. 열기 건조 공정이 진행되는 동안 외부 공기의 온도는 20℃였고, 상대습도는 27%였다. 이를 바탕으로 반응기 외부에서 유입되는 건조 공기를 가열하는 데 필요한 이론적 소요 열에너지(H_{6da})는 15,595.44 kJ로 계산되었고, 반응기 외부에서 유입되는 수증기를 가열하는 데 필요한 이론적 소요 열에너지(H_{6uv})는 111.51 kJ로 계산되었다.

3.1.8. 이론적 소요 열에너지의 총합

과열증기 건조-열처리 공정의 여섯 가지 이론적 소요 열에너지의 총합은 143,343.41 kJ로 계산되었고, 열기 건조 후 열기 열처리 공정의 여섯 가지 이론적 소요 열에너지의 총합은 133,043.67 kJ로 계산되었다. 각각의 공정에 이론적 소요 열에너지의 크기는 다르지만 전체 총합은 유사하게 나타났다. 과열증기 건조-열처리 공정과 열기 건조 후 열기 열처리 공정의 처리 조건(투입한 낙엽송 판재의 전건 무게, 초기 함수율, 목재와 공기의 초기 온도, 열처리 온도 및 시간 등)이 비슷하기 때문에 이론적인 소요 열에너지는 비슷한 값을 갖는 것으로 생각되었다.

3.2. 에너지 손실 및 에너지 효율

각각의 공정에서 실제로 사용된 에너지는 과열증기 목재 건조-열처리 공정에서 179,285.24 kJ, 열기 열처리 공정에서 149,812.91 kJ, 열기 건조 공정에서는 123,588.36 kJ로 측정되었다. 즉, 열기 건조 후 열처리 공정에서는 총 273,401.27 kJ의 에너지가 사용되었다. 이는 과열증기 건조 열처리 공정에 비해 94,116.03 kJ의 에너지가 더 많이 사용되었음을 의미하며, 과열증기 건조-열처리 공정에서는 에너지 손실량이 35,941.83 kJ로 계산된 반면에 열기 건조 후 열기 열처리 공정에서는 에너지 손실량이 140,357.60 kJ로 매우 크게 계산되었다. 과열증기 건조-열처리 공정에서 목재의 온도 변화(Figure II-8)와 열기 열처리 공정에 목재의 온도 변화(Figure III-1)를 비교해보면 열기 열처리의 경우 목재의 온도가 최고 온도에 도달한 이후 오랜 시간 동안 유지되는 것을 알 수 있다. 이 시간 동안 사용된 열에너지는 에너지 손실로 고려된다. 열기 열처리의 경우 과열증기 건조-열처리의 경우보다 목재가 고온에서 오랜 시간동안 노출되었기 때문에 열처리 효과가 높게 나타날 것으로 생각되어 열처리 시간을 단축시킴으로써 에너지 손실량을 줄일 수 있을 것으로 생각되지만, 이전의 연구 결과에서는 과열증기 건조-열처리재의 경우, 다량의 수분을 포함하고 있는 상태에서 열처리가 진행되기 때문에 열가수분해가 촉진되어 동일한 시간동안 열처리한 열기 열처리재보다 높은 열처리 효과를 나타내었다(Park *et al.*, 2014). 다시 말해서 열처리 효과에 대한 시간 및 에너지 효율은 과열증기 건조-열처리가 열기 열처리보다 높다는 것을 의미한다. 또한 같은 목재 열처리 장치를 동일한 시간동안 이용하였기 때문에 실제로 사용된 전력량이 큰 차이가 없어야 하지만, 이론적 소요 열에너지(특히, H_4 와 H_5)에서는 큰 차이가 나는 것으로 계산되었고, 이 차이가 에너지 손실량으로 계산되었다. 결과적으로 에너지 손실량의 차이에 의해 과열증기 건조 열처

리 공정의 에너지 효율(79.95%)은 열기 건조 후 열기 열처리 공정의 에너지 효율(48.66%)보다 약 2배 정도 높게 나타났다.

Table Ⅲ-2. Values measured during the drying and the heat treatment for evaluation of the required heat energy and energy efficiency for the drying and heat treatments (Park *et al.*, 2017).

		열기 건조 후 열기 열처리	과열증기	
		열기 건조	열기 열처리	건조-열처리
목재의 전건 무게 (W_0 , kg)		86.77	86.77	79.53
건조 또는 열처리 전 목재의 초기 온도 (T_{wi} , °C)		20.00	19.37	9.89
건조 또는 열처리 후 목재의 최종 온도 (T_{wf} , °C)		80.00	242.80	224.60
반응기 주변 공기의 온도 = 건조/열처리 전 공기의 온도 (T_{∞} , °C)		20.00	20.00	20.00
건조 또는 열처리 전 목재의 초기 함수율 (MC_i , %)		40.73	10.08	43.07
건조 또는 열처리 후 목재의 최종 함수율 (MC_f , %)		10.08	0.00	0.00
건조 또는 열처리 후 반응기 내 공기/증기의 최종 온도 (T_{ai} , °C)		80.00	250.00	250.00
이론적 소요 열에너지 (kJ)	H_1	8,560.91	26,177.59	28,905.40
	H_2	1,772.84	4,446.61	5,807.30
	H_3	2,197.00	0.00	0.00
	H_4	49,178.78	24,729.75	97,636.34
	H_5	84.65	188.59	10,994.37
	H_6	15,706.95	0.00	0.00
	H	77,501.13	55,542.54	
		133,043.67		143,343.41
실제 사용된 에너지 (P , kJ)		123,588.36	149,812.91	
		273,401.27		179,285.24
에너지 효율 (%)		48.66		79.95
에너지 손실량 (kJ)		140,357.60		35,941.83

4. 결론

본 장에서는 0.5 MPa의 압력과 250°C의 온도를 갖는 과열증기 조건에서 18시간동안 낙엽송 판재를 건조-열처리한 공정의 이론적 소요 열에너지를 정량적으로 계산하고, 실제 공정에서 사용된 에너지량을 측정 한 다음 에너지 손실량과 에너지 효율을 계산하였다. 또한, 이와 유사한 초기 조건을 갖는 낙엽송 판재를 열기 건조한 후, 대기압에서 250°C의 온도를 갖는 열기를 이용하여 열기 열처리한 공정의 결과와 비교하였다.

각 공정에서 몇몇 이론적 소요 열에너지(목재로부터 제거될 수분의 가열과 증발을 위한 열에너지, 과열증기 생성을 위한 열에너지, 반응기 내 공기의 가열을 위한 열에너지, 반응기 외부로부터 유입되는 공기의 가열을 위한 열에너지 등) 값은 큰 차이를 나타내었지만 전체 이론적 소요 열에너지의 총합은 유사하게 나타났다. 하지만 열기 건조 후 열기 열처리 공정에서 약 94,000 kJ 정도 많은 양의 에너지가 실제로 사용되었다.

과열증기 건조-열처리 공정의 에너지 효율은 79.95%로 계산되었고, 열기 건조 후 열기 열처리 공정의 에너지 효율은 48.66%로 계산되어 과열증기 건조-열처리 공정의 에너지 효율이 열기 건조 후 열기 열처리 공정의 에너지 효율보다 약 2배 정도 높게 나타났다.

또한, 전체 공정에 소요되는 시간을 고려하면 과열증기 건조-열처리와 열기 열처리 공정은 18시간의 시간이 소요된 반면에 열기 건조 후 열기 열처리 공정은 과열증기 건조-열처리 공정보다 열기 건조에 필요한 7일의 시간이 더 필요하게 된다.

따라서 과열증기 건조-열처리 공정은 열기 건조 후 열기 열처리 공정보다 시간과 에너지 모두를 절약할 수 있다.

제 4 장

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송재의 화학적 주성분 변화 분석

1. 서론

목재는 열처리에 의해 세포벽 구성성분과 추출물이 분해되면서 화학적 주성분의 함량이 변화된다. 열처리에 의한 화학적 주성분 변화는 열처리 시간과 온도, 수종 및 열처리 방법(열전달 매개체의 종류)에 따라 달라진다(Kim *et al.*, 2012; Ferrari *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016). 일반적으로 150℃ 이하에서 목재는 자유수와 결합수가 제거되는 건조 공정이 이루어진다. 목재 열처리가 주로 이루어지는 160~260℃의 온도 범위에서는 목재의 화학적 주성분이 변화된다. 이 온도 범위에서 화학적 변화는 주로 세포벽 구성성분의 자기 축매 반응에 의해 이루어지는 것으로 알려져 있다(Tjeerdsma and Militz, 2005). 먼저 목재 세포벽 구성 성분 중 열에 가장 민감한 헤미셀룰로오스가 탈아세틸화 반응에 의해 분해되고, 분해 산물인 acetic acid가 축매 역할을 하면서 탈중합반응이 이루어진다(Boonstra and Tjeerdsma, 2006; Esteves and Pereira, 2009). 셀룰로오스는 결정역역에 의한 영향으로 열처리에 의한 변화가 거의 없는 것으로 알려져 있다(Esteves and Pereira, 2009). 또한 열처리는 리그닌의 β -O-4 결합을 깨는 것으로 알려져 있다(Wikberg and Maunu, 2004). 송진과 같은 추출물은 200℃ 이상의 온도에서는 목재로부터 휘발되어 사라진다(Nuopponen *et al.*, 2003). 260℃ 이상에서 목재는 이산화탄소 같은 열분해산물을 생성하면서 탄화되기 시작한다(Esteves and Pereira, 2009).

본 장에서는 과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송 판재의 화학적 주성분 함량비 변화를 정량/정성적으로 평가해보고자 한다. 또한 이를 열기 건조 후 열기 열처리된 낙엽송 판재의 화학적 주성분 함량비와 비교하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 과열증기 건조-열처리

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송의 화학적 주성분 함량비 변화를 확인하기 위한 과열증기 건조-열처리 공정은 제2장에서 시험한 공정 중 0.5 MPa, 250℃ 과열증기 조건에서 18시간 동안 히터를 가동한 공정을 적용하였다.

Figure IV-1은 과열증기 건조-열처리 전/후 화학적 주성분의 함량비 비교를 위한 시편 준비 방법을 나타낸 그림이다. 폭 150 mm, 두께 50 mm, 길이 2.7 m 크기의 낙엽송 판재에서 양쪽 끝 320 mm는 섬유방향으로의 함수율 분포를 고르게 하기 위해 제거하였다. 남은 판재에서 양쪽 끝 20 mm와 가운데 20 mm 길이의 조각을 떼어내 무처리재의 화학적 주성분 함량을 측정하기 위한 시편으로 사용하였고, 길이 1 m 크기의 낙엽송 판재를 과열증기 건조-열처리한 다음 시편의 가운데에서 30 mm 길이의 조각을 떼어내 과열증기 건조-열처리 낙엽송재의 화학적 주성분 함량비를 측정하기 위한 시편으로 사용하였다.

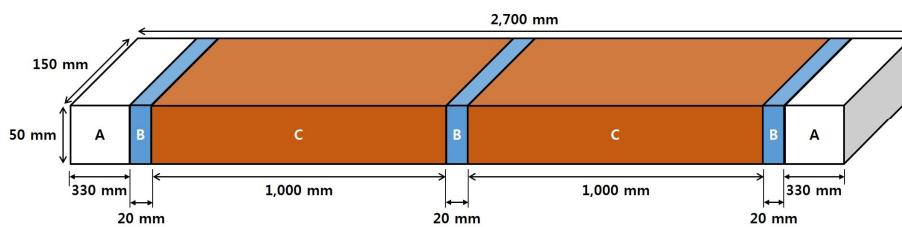


Figure IV-1. Preparation of the larch lumber for the drying and heat treatment using superheated steam and the analysis of major chemical components in wood

- A. Pieces removed to equalize moisture content along to the longitudinal direction (320 mm)
- B. Specimens to evaluate the major chemical components in non-treated wood (20 mm)
- C. Specimens to evaluate the major chemical components in heat-treated wood (1 m)

2.2. 열기 건조 후 열기 열처리

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송의 화학적 주성분 함량비 변화에 대한 대조군으로서 열기 건조 후 열기 열처리한 낙엽송재의 화학적 주성분 함량을 평가하였다. 열기 건조 및 열기 열처리 공정은 제3장에서 수행한 FPL 열기 건조 스케줄에 따라 열기 건조한 후, 대기압 하에서 250℃의 열기에서 18시간 동안 열기 열처리한 공정을 적용하였다.

과열증기 건조-열처리 낙엽송재와 같이 열기 건조 후 열기 열처리된 1 m 길이 판재의 가운데에서 30 mm 길이의 시편을 떼어내 열기 열처리재의 화학적 주성분 함량비 평가에 사용하였다.

2.3. 화학적 주성분 함량 측정

무처리재 및 열처리재의 화학적 주성분 함량비를 측정하기 위하여 모든 시편을 0.5 mm 이하로 밀링하였다. 밀링된 시편은 알코올-벤젠 1:2 (v/v) 용액에서 추출하였고, 추출된 물질의 함량을 낙엽송 판재에 포함된 추출물의 함량으로 결정하였다. 알코올-벤젠 용액에 의해 추출물이 제거되고 남은 잔사 0.3 g을 30℃의 72% 황산 수용액 3 mL에 넣고 1시간 동안 반응시킨 후에 84 mL의 증류수를 추가하여 4%의 황산 수용액을 만들었다. 이 시료를 121℃로 설정된 autoclave에서 다시 1시간 동안 반응시킨 다음, glass filter(1G4, Iwaki, Japan)를 통해 증류수를 이용하여 걸러내었다. Glass filter에 걸려져 남은 잔사를 전진하여 무게를 측정함으로써 Klason 리그닌의 함량을 결정하였다 (NREL/TP-510-42623, 2008). 또한 Klason 리그닌에 포함되어 있는 화학 물질의 종류를 평가하기 위하여 Klason 리그닌 측정에 사용된 잔사를 pyrolysis gas chromatography(pyrolysis-GC/MS)를 이용하여 분석하였다. 2 mg의 Klason 리그닌 잔사를 내부 표준물질(fluoranthene)과 함께 2.6 μ m의 석영 튜브에 주입한 다음 CDS Pyroprobe 5000 (CDS Analytical Inc., Oxford, PA, USA)을 이용하여 600℃의 온도에서 20초 동안 10℃/ms의 승온 속도로 헬륨 가스 내에서 열분해하였다. 열분해 결과로 방출된 휘발성 화학물질은 gas chromatography (Agilent Technologies 7890A)와 mass selective detector (Agilent Technologies 5975A)를 이용하여 분석하였다. Klason 리그닌은 황산 수용액에 녹지 않고 잔사로 남아있는 리그닌으로서 목재 세포벽을 구성하는 리그닌 중에는 산에 녹는 성분도 포함되어 있다. 따라서 Klason 리그닌 외에 산에 녹는 리그닌(acid soluble lignin, ASL)의 함량을 추가로 측정하였다. 황산 수용액에 의해 녹은 여과액을 증류수로 (1:14, v/v) 희석한 다음 석영 큐벳에 넣고, 자외선 가시 분광 광도계

(UV-1601 PC, Shimadzu, Japan)를 사용하여 205 nm에서의 흡광도를 통해 ASL의 함량을 측정하였다. 황산 수용액에 의해 녹아 나온 여과액 속에 포함된 당 성분들(glucan, xylan, mannan, galactan, arabinan)의 함량은 CarboPac PA-1 컬럼(250 × 4 mm, Dionex, Palo Alto, CA, USA)과 펄스 전류계 검출기(HP 1100, Hewlett Packard, USA)가 설치된 bio-liquid chromatography(ICS-2500, Thermo Dionex, Palo Alto, CA, USA)를 이용하여 측정하였다(Jeong *et al.*, 2016). 무처리재 및 열처리재의 화학적 주성분 함량 측정 과정은 Figure IV-2에 정리하였다.

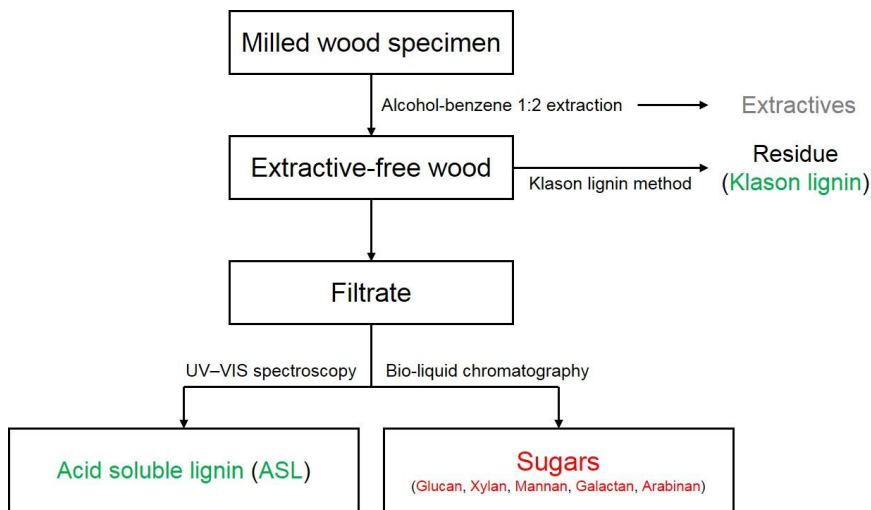


Figure IV-2. Procedures for determining major components in wood

2.4. 과열증기 건조-열처리에 의해 발생한 응축액 성분 분석

열기 열처리 공정과는 다르게 과열증기 건조-열처리 공정에서는 공정 중 고온의 열처리에 의해 목재로부터 분해되는 다양한 화학물질이 과열증기와 함께 응축기로 포집되어 응축된 다음 회수된다. 고온의 열처리에 의해 목재의 세포벽 구성성분 중 헤미셀룰로오스가 다량 분해되는 것으로 알려져 있다(Boonstra and Tjeerdsma, 2006; Esteves and Pereira, 2009). 따라서 응축기에서 회수된 응축액 내에는 다양한 유효 화학물질이 포함되어 있을 것으로 생각된다.

응축액은 과열증기 건조-열처리 공정이 진행되는 동안 과량의 수증기 배출과 함께 기체 상태로 응축기에 포집되어 응축/회수된 기체 응축액(gas condensate)과 과열증기 건조-열처리 공정이 종료된 후, 반응기 내에서 응축되어 액체 상태로 응축기에 회수된 액체 응축액(liquid condensate)으로 구분하여 HPLC(high performance liquid chromatography)를 통해 정량/정성 분석하였다. HPLC 분석에는 Dionex Ultimate 3000(USA)이 사용되었다. 검출기는 RI(ERC, RefractoMAX520, Japan)가 사용되었으며, 컬럼은 Aminex 87H가 사용되었다. 화학물질은 40℃로 설정된 오븐에서 90분 동안 0.5 mL/min의 속도로 분석했다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙엽송 판재의 화학적 주성분 분석 결과

Table IV-1은 과열증기 건조-열처리와 열기 열처리 전과 후의 낙엽송 판재 내 화학적 주성분의 함량비를 정리한 결과이다. 열전달 매개체의 종류는 달랐지만 열처리 전과 후의 상대적인 화학적 주성분의 함량 비율의 변화는 유사하게 나타났다. 두 가지 열처리 방법에서 모두 glucan과 추출물의 상대적인 함량 비율은 거의 변화가 없거나 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나 헤미셀룰로오스의 주요 구성성분으로 알려져 있는 xylan, mannan, galactan, arabinan의 상대적인 함량비는 크게 감소하였고, Klason 리그닌의 상대적인 함량비는 크게 증가했다.

Table IV-1. Relative percentage contents of the major chemical components in larch lumber before and after both heat treatment methods

Major chemical components in larch lumber	Drying and heat treatment using superheated steam		hot-air heat treatment after kiln drying	
	Before treatment	After treatment	Before treatment	After treatment
Glucan	37.5 %	34.9 %	33.8 %	34.3 %
Xylan	3.6 %	1.2 %	3.5 %	1.2 %
Mannan	11.8 %	3.9 %	9.9 %	4.3 %
Galactan	10.9 %	0.3 %	17.0 %	2.3 %
Arabinan	2.1 %	0.0 %	2.7 %	0.2 %
Klason lignin	28.8 %	55.6 %	28.4 %	54.1 %
Acid soluble lignin (ASL)	0.4 %	0.3 %	0.3 %	0.4 %
Extractives	4.9 %	3.8 %	4.4 %	3.2 %
Total	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %

헤미셀룰로오스는 목재 세포벽 구성성분 중에서 열에 가장 민감한 것으로 알려져 있다. 기존 연구 결과에 따르면, 열처리에 의한 헤미셀룰로오스의 분해는 탈아세틸화(deacetylation) 반응과 함께 시작되고, 분해산물로 생성된 acetic acid가 탈중합반응(depolymerization)의 촉매 역할을 하면서 다당류의 분해가 가속화된다고(Boonstra and Tjeerdsma, 2006; Esteves and Pereira, 2009). 산촉매에 의한 분해는 formaldehyde, furfural 그리고 aldehyde의 생성을 유도한다(Tjeerdsma *et al.*, 2008). 동시에 헤미셀룰로오스는 수산기($-OH$)의 수를 감소시키는 탈수 반응(hydration reaction)을 겪게 된다(Weiland and Guyonnet, 2003).

Klason 리그닌의 상대적인 함량비는 증가하였지만, 리그닌의 함량을 측정하기 위한 방법인 Klason 리그닌법에 의해 결정된 Klason 리그닌은 순수한 리그닌은 아닌 것으로 생각된다. 이전의 연구 결과에서는 리그닌은 고온의 열처리에 의해 다른 세포벽 구성성분들과 중축합반응하여 상대적인 함량비가 증가된 것처럼 보인다고 보고한 바 있다(Tjeerdsma and Militz, 2005; Boonstra and Tjeerdsma, 2006; Esteves *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2012). 과열증기 건조-열처리 전 목재의 예상 전건 무게가 81.0 kg이었고, 상대적인 Klason 리그닌의 함량비가 28.8%이므로 과열증기 건조-열처리 전 목재 내 리그닌의 양은 23.3 kg으로 계산된다. 반면에, 과열증기 건조-열처리 후 목재의 전건 무게가 73.9 kg이고, 상대적인 Klason 리그닌의 함량비가 55.6%이므로 과열증기 건조-열처리 후 목재 내 리그닌의 양은 41.1 kg으로 계산된다. 고온의 열처리에 의해 리그닌의 실제 양이 증가할 수 없다는 것을 고려하면, Klason 리그닌법에 의해 측정된 Klason 리그닌의 함량 증가는 리그닌과 다른 세포벽 구성성분(아마도 헤미셀룰로오스로부터 분해된 화합물)이 서로 결합하여 황산 수용액에 녹지 않고 잔사로 남았기 때문인 것으로 생각된다. Figure IV-3은 과열증기 건조-열처리 전

과 후의 Klason 리그닌을 pyrolysis-GC/MS 분석한 결과를 나타낸 그래프이다. 과열증기 건조-열처리 전 낙엽송재의 Klason 리그닌과는 다르게 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재의 Klason 리그닌에서는 2-methylfuran, 2,5-dimethylfuran, 2-ethyl-5-methylfuran, 5-methyl-2-furancarboxaldehyde과 같은 furan계 화합물이 15분의 반응시간 이내에 검출되었다. 이러한 furan계 화합물은 열처리에 의해 헤미셀룰로오스로부터 분해된 다음 리그닌과 결합하여 Klason 리그닌 법에서 황산 수용액에 녹지 않고 잔사로 남은 것이라 생각된다. 즉, Klason 리그닌의 상대적 함량비가 증가한 것은 리그닌 자체가 증가했다기보다는 헤미셀룰로오스로부터 분해된 furan계 화합물이 리그닌과 결합하여 Klason 리그닌의 함량이 증가한 것처럼 보이는 것이라 볼 수 있다.

셀룰로오스는 결정영역 때문에 열처리에 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있다(Esteves and Pereira, 2009). 이러한 이유 때문에 과열증기 건조-열처리와 열기 건조 후 열기 열처리에 의한 glucan의 상대적인 함량비 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

추출물의 상대적인 함량비는 거의 변화가 없었다. 하지만 목재 내에 포함되어 있는 천연 추출물은 열에 매우 민감하기 때문에 열처리에 의해 대부분 분해되거나 휘발되어 사라지고, 목재 세포벽으로부터 분해된 새로운 화합물이 알코올-벤젠 1:2 (v/v) 용액에 용해되어 추출물로 측정된 것이라 생각된다(Bourgois and Guyonnet, 1988; Nuopponen *et al.*, 2003; Esteves *et al.*, 2008).

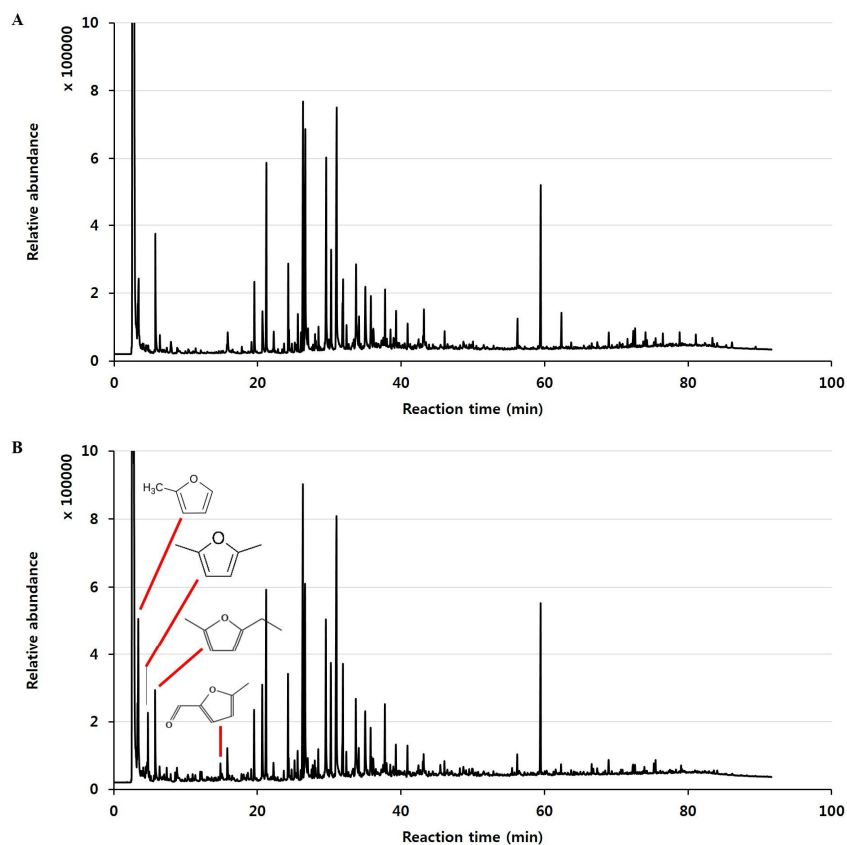


Figure IV-3. Pyrolysis GC/MS chromatographs for the Klason lignin

A. Klason lignin of the larch lumber before drying and heat treatment using superheated steam

B. Klason lignin of the larch lumber after drying and heat treatment using superheated steam

3.2. 과열증기 건조-열처리에 의해 발생한 응축액 성분 분석

Figure IV-4A는 과열증기 건조-열처리에 의해 발생한 기체상 응축액이고, Figure IV-5A는 액체상 응축액의 사진이다. 노란 빛을 띠는 기체상 응축액은 20.5 kg이 회수되었고, 갈색 빛을 띠는 액체상 응축액은 4.9 kg이 회수되었다.

Figure IV-4B는 다섯 개의 피크를 갖는 기체상 응축액의 HPLC 분석 결과를 보여준다. 각각의 피크는 순서대로 formic acid, acetic acid, levulinic acid, 5-hydroxymethylfurfural(5-HMF), furfural을 의미한다(Table IV-2). 기체상 응축액 내에는 furfural이 가장 많은 양을 차지했고, 헤미셀룰로오스로부터 분해되어 나온 acetic acid도 많은 양을 차지하고 있었다.

Figure IV-5B는 여덟 개의 피크를 갖는 액체상 응축액의 HPLC 분석 결과를 보여준다. 각각의 피크는 순서대로 glucan, XMG(xylan + mannan + galactan), arabinan, formic acid, acetic acid, levulinic acid, 5-HMF, furfural을 의미한다(Table IV-3). 액체상 응축액 내에는 기체상 응축액에서는 검출되지 않았던 당 성분들(glucan, XMG, galactan)이 다량 검출되었다. 특히 헤미셀룰로오스의 주요 구성성분인 XMG는 액체상 응축액 내에서 가장 많은 양이 포함되어 있다. 액체상 응축액 내의 당 성분들은 고온의 열처리에 의해 헤미셀룰로오스로부터 분해되어 액상으로 반응기 내에 존재하다가 반응이 종료된 후에 반응기 내에서 과열증기가 응축된 물과 함께 액체상 응축액으로 회수된 것이라 생각된다. 이는 고온의 열처리에 의해 목재 세포벽의 구성성분 중 헤미셀룰로오스가 가장 많이 분해되는 증거로 볼 수 있다.

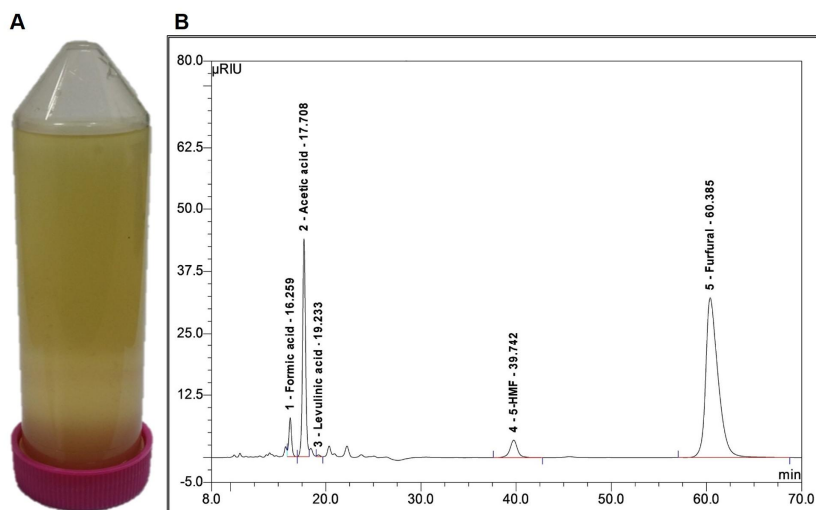


Figure IV-4. Gas condensate collected in the condenser during the drying and heat treatment using superheated steam

A. Gas condensate

B. HPLC analysis for the gas condensate

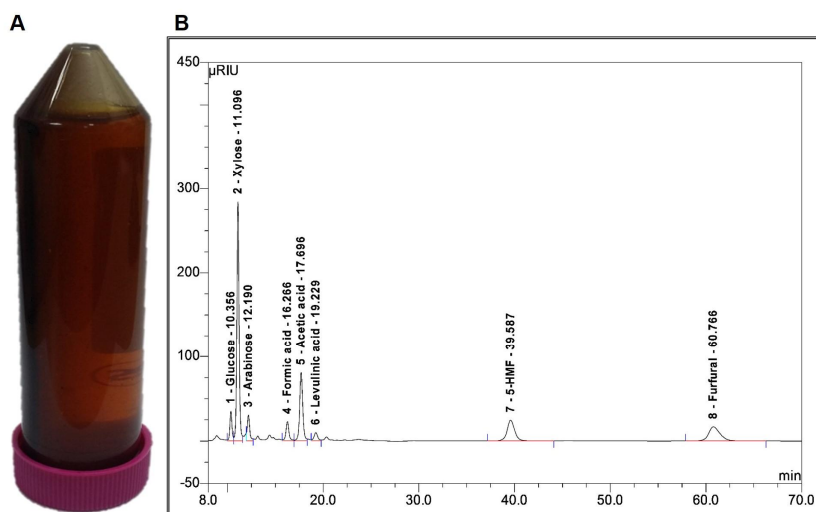


Figure IV-5. Liquid condensate collected in the condenser during the drying and heat treatment using superheated steam

A. Liquid condensate

B. HPLC analysis for the liquid condensate

Table IV-2. Chemical name and content in gas condensate by HPLC analysis

No.	Retention time (min)	Chemical name	^a Chemical content (mg/L)
1	16.26	Formic acid	2,508.2
2	17.71	Acetic acid	11,818.5
3	19.23	Levulinic acid	59.5
4	39.74	5-HMF	881.0
5	60.39	Furfural	15,750.6

^aChemical content means weight (mg) of chemical per 1 L of condensate

Table IV-3. Chemical name and content in liquid condensate by HPLC analysis

No.	Retention time (min)	Chemical name	^a Chemical content (mg/L)
1	10.36	Glucan	3,166.9
2	11.10	^b XMG	27,764.9
3	12.19	Arabinan	3,235.2
4	16.27	Formic acid	8,092.4
5	17.70	Acetic acid	22,595.7
6	19.23	Levulinic acid	2,047.2
7	39.59	5-HMF	6,254.9
8	60.77	Furfural	7,690.5

^aChemical content means weight (mg) of chemical per 1 L of condensate

^bXMG = Xylan + Mannan + Galactan

3.3. 낙엽송 판재의 화학적 주성분 분석 결과 mass balance

고온의 열처리에 의해 목재 세포벽 구성성분이 열분해되기 때문에 열처리 후에 목재의 전건 무게는 열처리 전 목재의 예상 전건 무게보다 작아진다. 열처리 전 목재의 예상 전건 무게와 실제 열처리 후 목재의 전건 무게의 차이를 질량 손실(mass loss)라 한다. 또한 열기 열처리의 경우에는 목재로부터 분해되어 나온 다양한 화학물질이 반응기 외부로 휘발되어 사라지거나 반응기 내 벽에서 타버리기 때문에 회수될 수 없이 손실되는 반면에 과열증기 건조-열처리의 경우에는 목재로부터 분해되어 나온 다양한 화학물질이 기체상 응축액과 액체상 응축액의 형태로 회수되기 때문에 정제를 통해 활용될 수 있다. 따라서 과열증기 건조-열처리 공정에서는 열처리에 의한 질량 감소량을 줄일 수 있다. 열기 열처리 공정과 비교하여 과열증기 건조-열처리 공정에서 회수되는 화학물질의 양을 정량적으로 비교하기 위하여 열처리 전 목재의 예상 전건 무게를 기준으로 화학적 주성분 함량비에 대한 mass balance를 비교하였다.

Table IV-4는 열처리 전 목재의 예상 전건 무게를 기준으로 각 화학적 주성분의 함량비에 대한 mass balance 결과이다. 과열증기 건조-열처리 공정에서는 열처리 전 목재의 예상 전건 무게 중 7.1 kg에 해당하는 양이 손실되었다. 하지만 기체상 응축액에서는 0.6 kg의 화학물질이 검출되었고, 액체상 응축액에서는 0.4 kg의 화학물질이 검출되었다. 만일 기체상 응축액과 액체상 응축액에 포함되어 있는 모든 화학물질을 분리/정제/회수하여 활용할 수 있다면 질량 손실은 6.1 kg으로 감소하게 된다. 열기 열처리 공정에서는 15.3 kg의 질량 손실이 발생하였다. 열기 열처리 공정에서 반응기 내에 다량의 산소가 포함되어 있고, 이에 따른 산화 반응에 의해 과열증기 건조-열처리 공정보다 질량 손실량이 많은 것으로 생각된다. 또한 열기 열처리 공정에서 목재의 세포

벽 구성성분으로부터 분해되어 나온 화학물질은 회수되어 재활용할 수 없기 때문에 15.3 kg의 질량 손실은 줄일 수 없다. 결과적으로 과열증기 건조-열처리 공정은 열기 열처리 공정에 비해 질량 손실량이 작을 뿐만 아니라 열처리에 의해 분해되어 나온 다양한 화학물질을 분리/정제/회수하여 재활용할 수 있을 경우 질량 손실량을 더 줄일 수 있는 방법이다.

Table IV-4. Mass balance of major chemical component of larch lumber before and after heat treatment

Major chemical component of wood	Drying and heat treatment using ^a SHS				hot-air heat treatment after kiln drying			
	Before heat treatment		After heat treatment		Before heat treatment		After heat treatment	
Glucan	30.4 kg	37.5 %	25.8 kg	31.8 %	29.3 kg	33.8 %	24.5 kg	28.3 %
Arabinan	1.7 kg	2.1 %	0.0 kg	0.0 %	2.3 kg	2.7 %	0.2 kg	0.2 %
Galactan	8.8 kg	10.9 %	0.2 kg	0.3 %	14.8 kg	17.0 %	1.6 kg	1.9 %
Xylan	2.9 kg	3.6 %	0.9 kg	1.1 %	3.1 kg	3.5 %	0.9 kg	1.0 %
Mannan	9.6 kg	11.8 %	2.9 kg	3.6 %	8.6 kg	9.9 %	3.1 kg	3.5 %
Klason lignin	23.3 kg	28.8 %	41.1 kg	50.8 %	24.6 kg	28.4 %	38.7 kg	44.6 %
Acid soluble lignin	0.3 kg	0.4 %	0.2 kg	0.2 %	0.3 kg	0.3 %	0.3 kg	0.3 %
Extractives	4.0 kg	4.9 %	2.8 kg	3.4 %	4.4 kg	4.4 %	2.3 kg	2.6 %
Gas condensate	–	–	0.6 kg	0.8 %	–	–	–	–
Liquid condensate	–	–	0.4 kg	0.5 %	–	–	–	–
Mass loss	–	–	6.1 kg	7.5 %	–	–	15.2 kg	17.6 %
Total	81.0 kg	100.0 %	81.0 kg	100.0 %	86.8 kg	100.0 %	86.8 kg	100.0 %

^aSHS : superheated steam

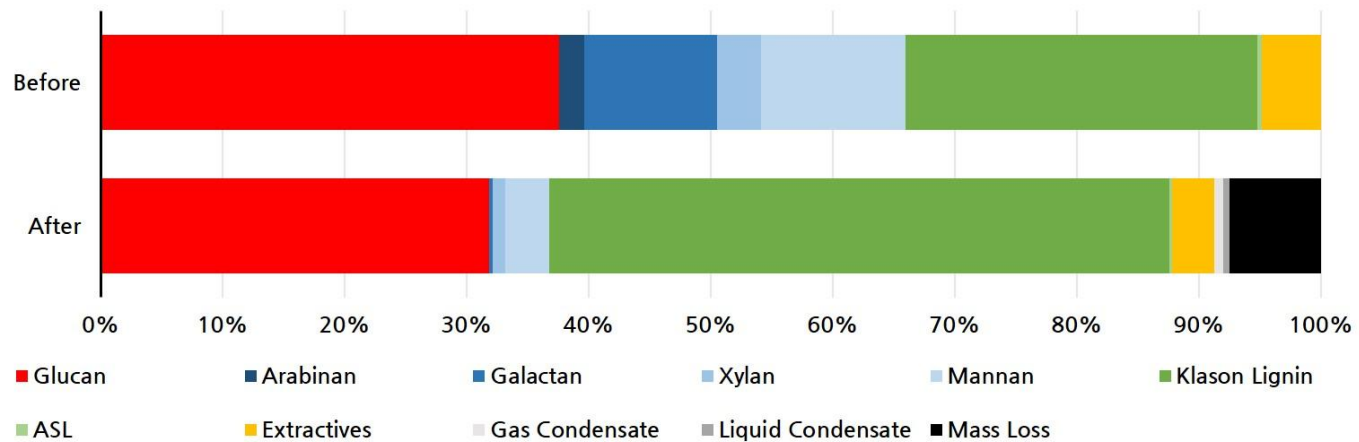


Figure IV-6. Relative percentage content changes of major chemical components in larch lumber before and after drying and heat treatment using superheated steam

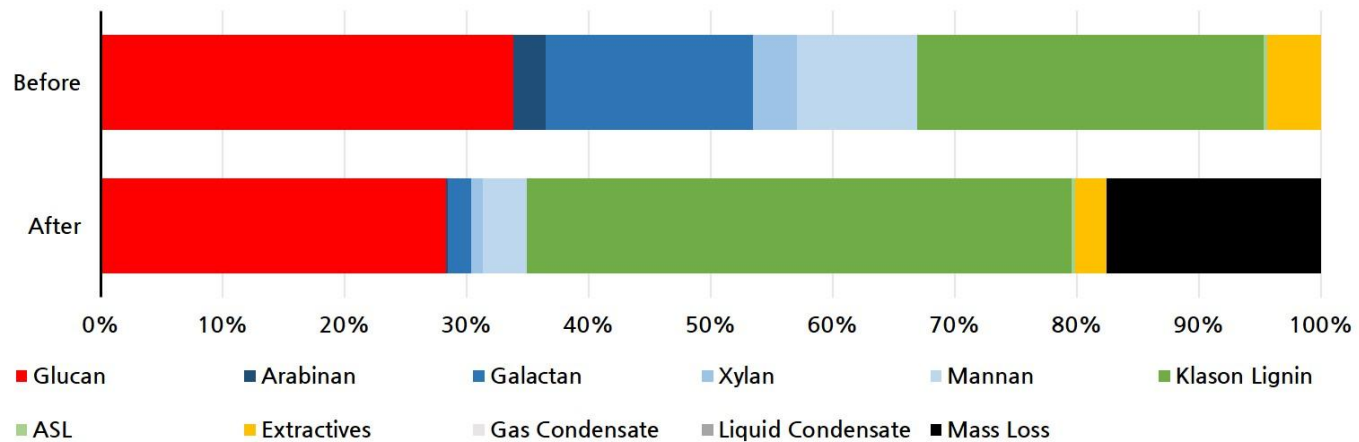


Figure IV-7. Relative percentage content changes of major chemical components in larch lumber before and after hot-air heat treatment

4. 결론

본 장에서는 과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송 판재의 화학적 주성분의 함량비 변화를 평가하였고, 이를 열기 건조 후 열기 열처리한 낙엽송 판재의 화학적 주성분의 함량비 변화와 비교하였다.

두 가지 열처리 방법에서 모두 xylan, mannan, galactan, arabinan의 상대적인 함량비는 감소하였고, Klason 리그닌의 상대적인 함량비는 증가하였다. 또한 glucan과 추출물의 상대적인 함량비는 거의 변하지 않았다. 리그닌은 열처리에 의해 헤미셀룰로오스로부터 분해된 furan계 화합물과 중축합반응하여 거대 리그닌 고분자화 되었기 때문에 Klason 리그닌 법으로 측정한 Klason 리그닌의 상대적 함량비가 증가한 것으로 생각된다.

과열증기 건조-열처리 공정을 통해 응축기에서 포집된 기체상 응축액과 액체상 응축액에는 목재 세포벽 구성성분으로부터 분해된 다양한 화학물질이 검출되었으며, 특히 액체상 응축액 내에는 헤미셀룰로오스로부터 분해되어 나온 당 성분이 다량 검출되었다. 기체상 응축액과 액체상 응축액에서 검출된 다양한 화학물질은 분리/정제/회수하여 재활용할 수 있다면 열처리에 의한 질량손실을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

제 5 장

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송의 세포벽 구조 변화 분석

1. 서론

목재는 세포의 집합체이다. 대부분의 세포는 길쭉하고 양쪽이 뾰족한 형태를 띠고 있지만 그 크기는 매우 다양하며 서로 강하게 결합되어 있다. 목섬유의 길이는 수종과 임목의 생장 부위에 따라서도 매우 다르다. 활엽수의 섬유 길이는 0.25~1.50 mm 범위이고, 침엽수의 섬유(가도관) 길이는 3~8 mm 정도이다. 활엽수에는 도관 요소가 있는데 도관 요소가 횡단면에서 골고루 분포된 목재를 산공재라 하고, 연륜을 따라 환상으로 분포된 목재를 환공재라 한다. 그러나 침엽수에는 도관이 없고 가도관을 통해서 수액이 이동한다. 활엽수와 침엽수는 수에서 수피 쪽을 향해 수평으로 배열된 방사조직을 갖고 있다. 방사조직은 수액을 방사방향으로 이동시키는 통로이다. 이처럼 목재는 다양한 종류의 세포가 서로 다른 방향으로 배열되어 있기 때문에 방향과 단면에 따라 물리적·기계적 성질과 가공적 성질이 다른 이방성 재료이다. 수목의 줄기 방향을 섬유 방향(longitudinal direction), 목재의 중심이 수에서 수피 방향으로 방사조직이 향하는 방향을 방사 방향(radial direction), 연륜에 대하여 접선을 이루는 방향을 접선 방향(tangential direction)이라 한다. 그리고 줄기를 가로로 절단하여 생기는 단면을 횡단면(cross section), 방사조직을 따라 절단하여 생기는 단면을 방사단면(radial section), 연륜과 접선으로 절단하여 생기는 단면을 접선단면(tangential section)이라 한다. 특히 목재는 각 방향별로 다른 수축률을 갖고 있고, 이는 수축에 의한 결함 발생을 야기한다. 섬유방향의 수축률과 방사방향의 수축률 차이에 의해 표면 할렬, 횡단면 할렬 및 내부 할렬이 발생할 수 있고, 조재와 만재의 수축률 차이에 의해 윤할이 발생할 수 있다. 또한 세포 자체의 변형에 의해서 찌그러짐 현상이 발생할 수 있다. 또한 목재 세포벽은 고온의 열처리에 의한 결함이 발생한다. 고온의 열처리에 의해 세포벽을 구성하는 화학적 구성 성분이 분해되거나 변

형되며, 이것이 세포벽의 구성 변화에도 영향을 미치게 된다. 육안으로 관찰되는 할렬을 비롯하여 광학현미경을 통해 관찰되는 미세 할렬뿐만 아니라 전자 현미경을 통해 관찰되는 세포 자체의 결함이나 세포벽을 구성하는 각 층 사이에서 할렬이 발생하기도 한다(Fengel and Wegener, 1989; Boonstra, 2006a; Boonstra, 2006b).

본 장에서는 과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송의 세포벽 구조 변화에 대해서 광학 현미경(optical microscope), 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM), 투과 전자 현미경(transmission electron microscope, TEM)을 통해 분석하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 과열증기 건조-열처리

과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송의 세포벽 구조 변화를 확인하기 위한 과열증기 건조-열처리 공정은 제2장에서 시험한 공정 중 0.5 MPa, 250℃ 과열증기 조건에서 18시간 동안 히터를 가동한 공정을 적용하였다.

Figure V-1은 과열증기 건조-열처리에 사용된 낙엽송 판재 시편의 준비 방법을 나타낸 그림이다. 폭 150 mm, 두께 50 mm, 길이 2.7 m 크기의 낙엽송 판재에서 양쪽 끝 330 mm는 함수율 균일화를 위해 제거하였고, 할렬이나 웅이 등의 결함이 없는 곳에서 무처리재의 세포벽 구조를 확인하기 위한 시편으로 사용하였다. 남은 판재에서 양쪽 끝 20 mm는 초기 함수율 측정을 위해 사용했고, 남은 길이 2 m의 낙엽송 판재를 과열증기 건조-열처리 시편으로 사용하였다.

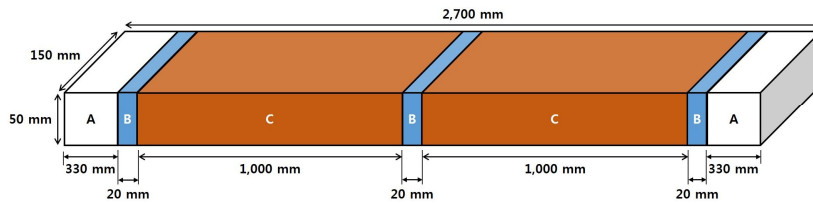


Figure V-1. Preparation of the larch lumber for the drying and heat treatment using superheated steam

- A. Pieces removed to equalize moisture content along to the longitudinal direction and specimens to evaluate cell wall structure of non-treated larch wood (330 mm)
- B. Specimens to evaluate the initial moisture content (20 mm)
- C. Specimens for the drying and heat treatment using superheated steam (2 m)

2.2. 세포벽 구조 분석을 위한 시편 준비

과열증기 건조-열처리재와 무처리재의 세포벽 구조를 광학 현미경, 주사 전자 현미경 및 투과 전자 현미경을 통해 분석하였다.

2.2.1. 광학 현미경

과열증기 건조-열처리재와 무처리재에서 옹이나 육안으로 관찰되는 할렬이 없는 위치에서 한 변의 길이가 10 mm인 정육면체 시편을 떼어냈다. 열처리재의 경우, 고온의 열처리에 의해 박편 제작 시 시편이 깨지는 경우가 종종 발생한다. PEG를 이용해 목재 내강을 채움으로써 시편이 깨지거나 뭉개지는 것을 방지하였다. Microtome(HM-340E, Microm Lab., Germany)을 이용하여 PEG 처리된 시편의 세 단면에서 각각 20~30 μm 두께의 박편을 제작했다. 박편 제작 시 사용된 PEG는 70°C로 설정된 오븐에서 녹인 다음, 증류수로 세척하여 제거했다. 무처리재 및 과열증기 건조-열처리재 박편은 추가 염색 없이 영구 슬라이드로 제작하여 광학현미경(S15A, Bimeince, Korea)을 통해 관찰했다(Figure V-2).



Figure V-2. Optical microscope(S15A, Bimeince, Korea)

2.2.2. 주사 전자 현미경

과열증기 건조-열처리재와 무처리재의 주사 전자 현미경 관찰용 시편은 광학 현미경 관찰을 위한 박편 제작 후 남은 조각을 이용하였다. 모든 시편은 수분을 모두 제거한 후에 백금을 이용하여 표면을 코팅한 다음 주사 전자 현미경(SIGMA FE-SEM, Carl Zeiss, England)을 통해 관찰했다(Figure V-3).

이미지 측정에는 이미지 스티칭(stitching) 기법이 사용되었다. 이미지 스티칭 기법은 둘 이상의 겹쳐지는(overlapping) 이미지들을 서로 매끄럽게 연결하여 하나의 큰 이미지로 결합하는 방법을 말하며, 이를 통해 넓은 면적의 고배율 사진을 획득할 수 있다.



Figure V-3. Field-emission scanning electron microscope
(SIGMA FE-SEM, Carl Zeiss, England)

2.2.3. 투과 전자 현미경

과열증기 건조-열처리재와 무처리재에서 웅이나 육안으로 관찰되는 할렬이 없는 위치에서 한 변의 길이가 5 mm인 정육면체 시편을 떼어냈다. Microtome을 이용하여 시편의 접선단면에서 50~60 μ m 두께의 박편을 제작한 다음 다시 방사단면에서 같은 두께로 얇게 잘라 가늘고 긴 시편을 제작했다. 시편은 투과 전자 현미경 관찰 및 초박편 제작을 위해 Karnovsky 고정액으로 고정하였다(Karnovsky, 1965). Karnovsky 고정액은 목재 시편에 적합하게 수정한 고정액을 이용하였다. 먼저 0.05M의 sodium cacodylate buffer (pH 7.2)에 2% para-formaldehyde와 2% glutaraldehyde를 넣고 4°C에서 2시간 동안 고정시킨 다음 0.05M의 sodium cacodylate buffer로 10분간 세 번 반복 세척하였다. 다음으로 0.05M의 sodium cacodylate buffer에 1% osmium tetroxide을 넣고 4°C에서 2시간 동안 2차 고정시킨 후에 증류수로 두 번 반복 세척하였다. 이후, 0.5%의 uranyl acetate를 이용하여 30분 간 염색(en bloc staining)하였다. 다음으로 시편 내에 수분을 제거하기 위해 상온에서 에탄올을 30%, 50%, 70%, 80%, 90%, 100%, 100%, 100% 순서대로 농도를 변화시키면서 각각 10분간 탈수시켰다. 탈수된 목재 시편을 100% propylene oxide에 넣고 15분 간 두 번씩 변이시킨 후에 Spurr's resin이 시편 내부로 침투되게 하였다. Spurr's resin 침투 과정은 propylene oxide와 Spurr's resin을 1:1 비율로 섞어서 2시간, 100% Spurr's resin에서 4시간 이상, 다시 100% Spurr's resin에서 2시간 동안 진행하였다. 최종적으로 70°C 오븐에서 24시간 동안 Spurr's resin을 경화시켰다. 경화된 시편의 단면(횡단면)을 Ultramicrotome(EM-UC7, Leica, Germany)을 이용하여 60~70 nm 두께의 초박편으로 제작하여 투과 전자 현미경(JEM-1010, JEOL, Japan)을 통해 관찰했다(Figure V-4).

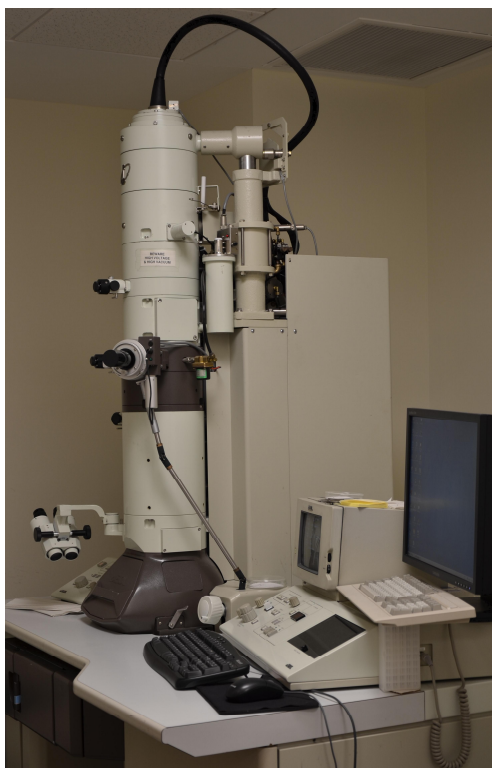


Figure V-4. Transmission electron microscope
(JEM-1010, JEOL, Japan)

3. 결과 및 고찰

3.1. 광학 현미경 관찰 결과

Figure V-5는 무처리 낙엽송재의 횡단면을 광학 현미경을 이용하여 40배의 배율로 관찰한 결과이고, Figure V-6은 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재의 횡단면을 광학 현미경을 이용하여 40배의 배율로 관찰한 결과이다. 과열증기 건조-열처리재의 횡단면에서는 방사조직을 따라 할렬이 발생한 것을 확인할 수 있다. 종축 가도관과 방사조직의 수축률이 서로 다르기 때문에 건조-열처리 과정에서 할렬이 발생한 것으로 생각되며 Figure V-6B와 같이 육안으로 관찰되지 않는 미세한 할렬은 열처리재의 강도 감소를 야기하는 것으로 생각된다(박 등, 2015B; 박 등, 2016). Figure V-7과 Figure V-8은 각각 무처리 낙엽송재와 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재의 방사단면을 광학 현미경을 이용하여 100배의 배율로 관찰한 결과이고, Figure V-9와 Figure V-10은 각각 무처리 낙엽송재와 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재의 접선단면을 광학 현미경을 이용하여 100배의 배율로 관찰한 결과이다. 광학 현미경을 통해 100배의 배율로 관찰한 결과로는 과열증기 건조-열처리에 의해 방사단면 및 접선단면에서 뚜렷한 세포 구조적 변화는 발견하기 어려웠으며, 주사 전자 현미경이나 투과 전자 현미경을 통해 과열증기 건조-열처리의 영향을 확인해야 할 것으로 생각되었다.

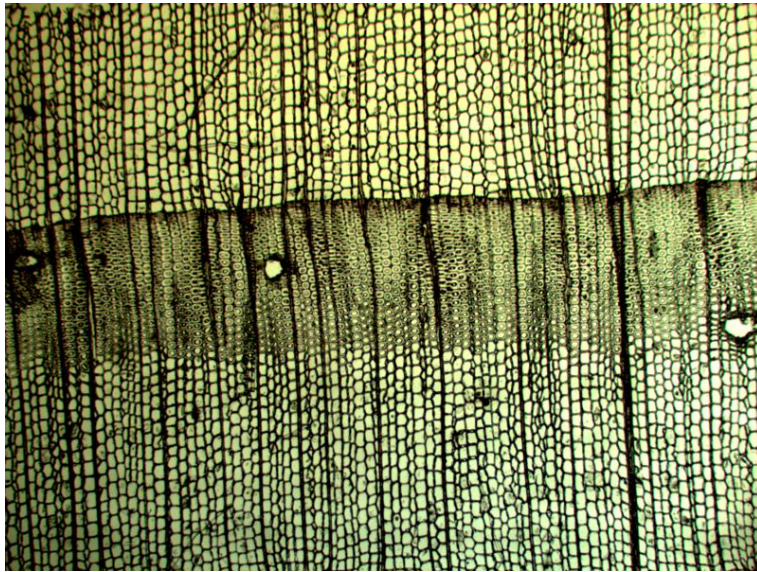


Figure V-5. Optical microscope image
(cross section of non-treated larch wood, $\times 40$)

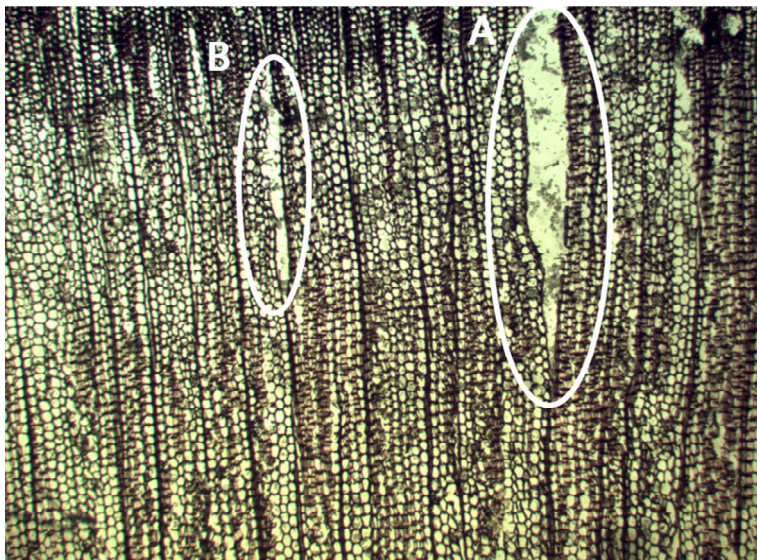


Figure V-6. Optical microscope image
(cross section of dried and heat-treated larch wood, $\times 40$)

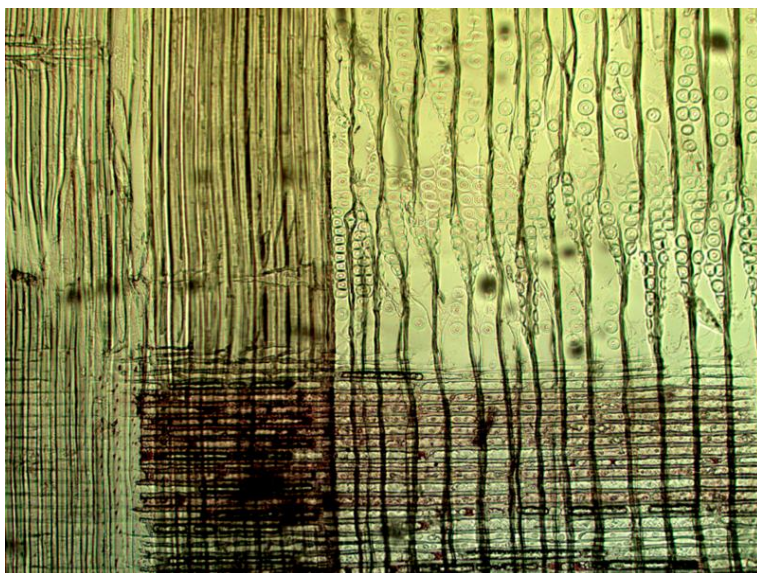


Figure V-7. Optical microscope image
(radial section of non-treated larch wood, $\times 100$)

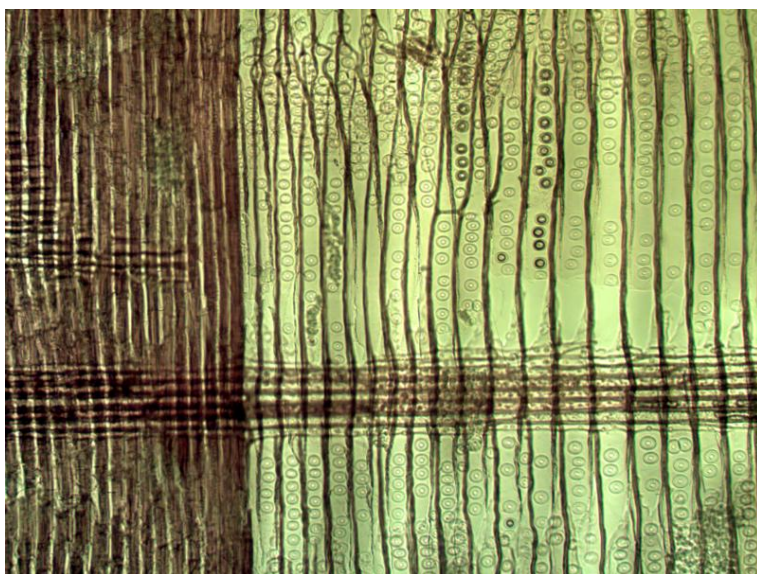


Figure V-8. Optical microscope image
(radial section of dried and heat-treated larch wood, $\times 100$)



Figure V-9. Optical microscope image
(tangential section of non-treated larch wood, $\times 40$)



Figure V-10. Optical microscope image
(tangential section of dried and heat-treated larch wood, $\times 100$)

3.2. 주사 전자 현미경 관찰 결과

Figure V-11은 무처리 낙엽송재의 횡단면을 주사 전자 현미경을 이용하여 2,000배의 배율로 관찰한 결과이고, Figure V-12는 과열증기 건조-열처리한 낙엽송재의 횡단면을 주사 전자 현미경을 이용하여 2,000배의 배율로 관찰한 결과이다. 무처리 낙엽송재의 조재는 사각형의 세포 모양을 유지하는 반면에 과열증기 건조-열처리한 낙엽송재의 조재는 찌그러진 형태로 나타났다 이는 건조-열처리 과정에서 수분이 감소함에 따라 세포가 수축하면서 발생한 현상인 것으로 생각된다. 무처리 낙엽송재의 만재는 세포벽이 깨끗하게 절단된 반면에 과열증기 건조-열처리한 낙엽송재의 만재는 세포벽(특히, 이차벽 내 S2층)에서 할렬이 발생함에 따라 매우 거칠게 절단되었다. 또한 중간층-일차벽-이차벽 사이의 경계층과 이차벽 내 S1-S2-S3층 사이가 분리되는 현상이 과열증기 건조-열처리재에서 두드러지게 많이 발생했다. 이는 고온에서 과열증기 건조-열처리가 이루어졌기 때문에 각 층의 마이크로피브릴 경사각 차이에 의해 층간 결합력이 약화되었고, 세포벽을 구성하는 구성 성분(특히, 헤미셀룰로오스)이 열분해되면서 세포 자체의 강도가 약해졌기 때문에 발생하는 현상인 것으로 생각된다.

Figure V-13은 무처리 낙엽송재의 방사단면을 주사 전자 현미경을 이용하여 5,000배의 배율로 관찰한 결과이고, Figure V-14는 과열증기 건조-열처리한 낙엽송재의 방사단면을 주사 전자 현미경을 이용하여 5,000배의 배율로 관찰한 결과이다. 과열증기 건조-열처리재의 방사단면에서는 과열증기 건조-열처리에 의해 가도관의 벽공이 막혀있는 것을 볼 수 있다(Figure V-14A). 또한 Figure V-14B와 같이 벽공을 막고 있는 토러스가 갈라진 것을 확인할 수 있다. 토러스가 갈라지는 것은 막힌 벽공 내부의 압력에 의한 것이거나 고온의 열처리에 의해 토러스의 강도가 약해진 것으로 생각된다.

Figure V-15와 Figure V-16은 무처리 낙엽송재의 접선단면을 주사 전자 현미경을 이용하여 5,000배의 배율로 관찰한 결과이고, Figure V-17과 Figure V-18은 과열증기 건조-열처리한 낙엽송재의 접선단면을 주사 전자 현미경을 이용하여 5,000배의 배율로 관찰한 결과이다. Figure V-15와 Figure V-17에서 보듯이 과열증기 건조-열처리재의 접선단면에서 관찰되는 방사 방향 세포들의 단면이 횡단면에서 관찰되는 것과 같이 과열증기 건조-열처리재에서 거칠게 절단된 것을 확인할 수 있었다. 또한 무처리재의 가도관 내벽에서는 관찰되지 않는 방울(droplet)이 과열증기 건조-열처리재의 가도관 내벽에서 발견되었다(Figure V-18A). 이는 Figure V-18B와 같이 부스러기 형태가 세포내벽 위에 얹혀있는 것과 달리 물방울 형태로 세포내벽 위에서 굳은 형태를 띠고 있다. 열처리재의 가도관 내벽에서 발견되는 방울은 고온의 열처리에 의해 세포벽을 구성하는 리그닌이 녹아서 세포벽 밖으로 흘러나온 것으로 알려져 있다(Anglès *et al.*, 2001; Pelaez-Samaniego *et al.*, 2014; Zhuang *et al.*, 2017).

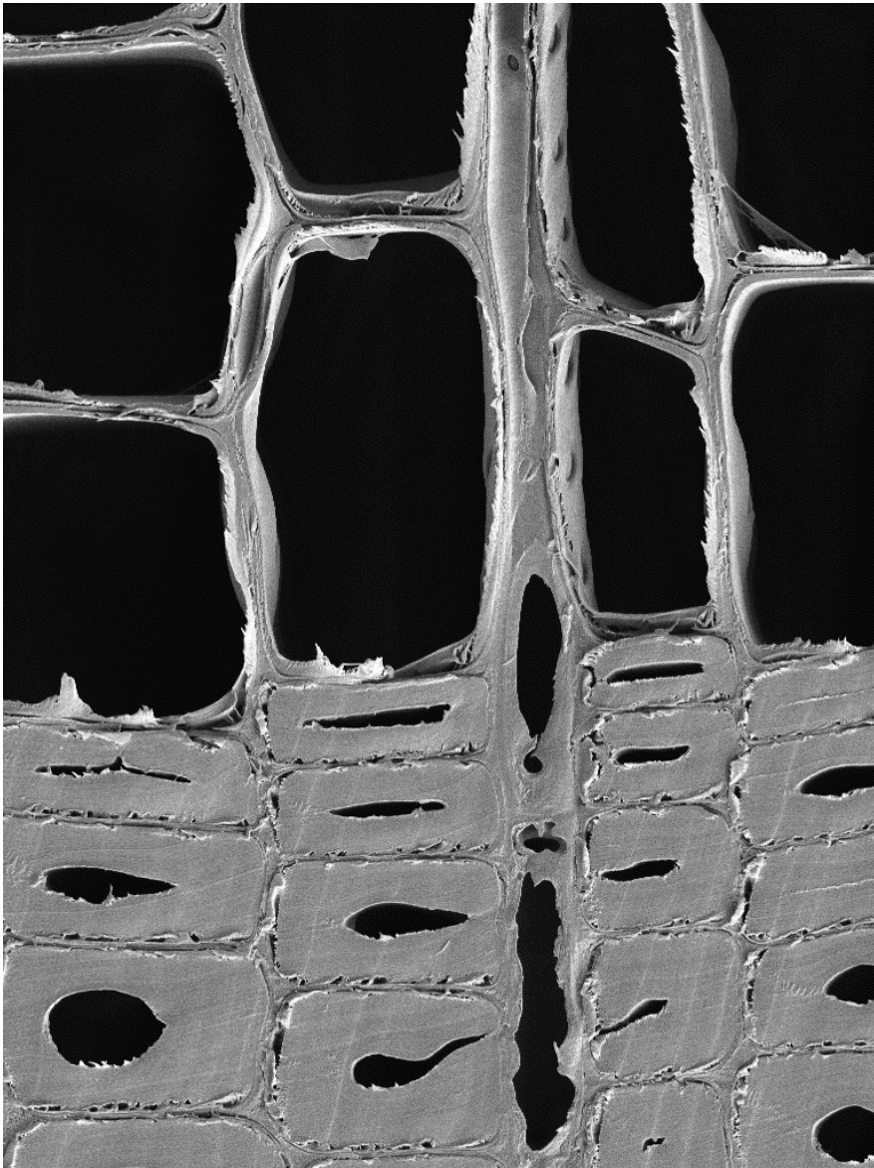


Figure V-11. Field-emission scanning electron microscope image
(cross section of non-treated larch wood, $\times 2,000$)

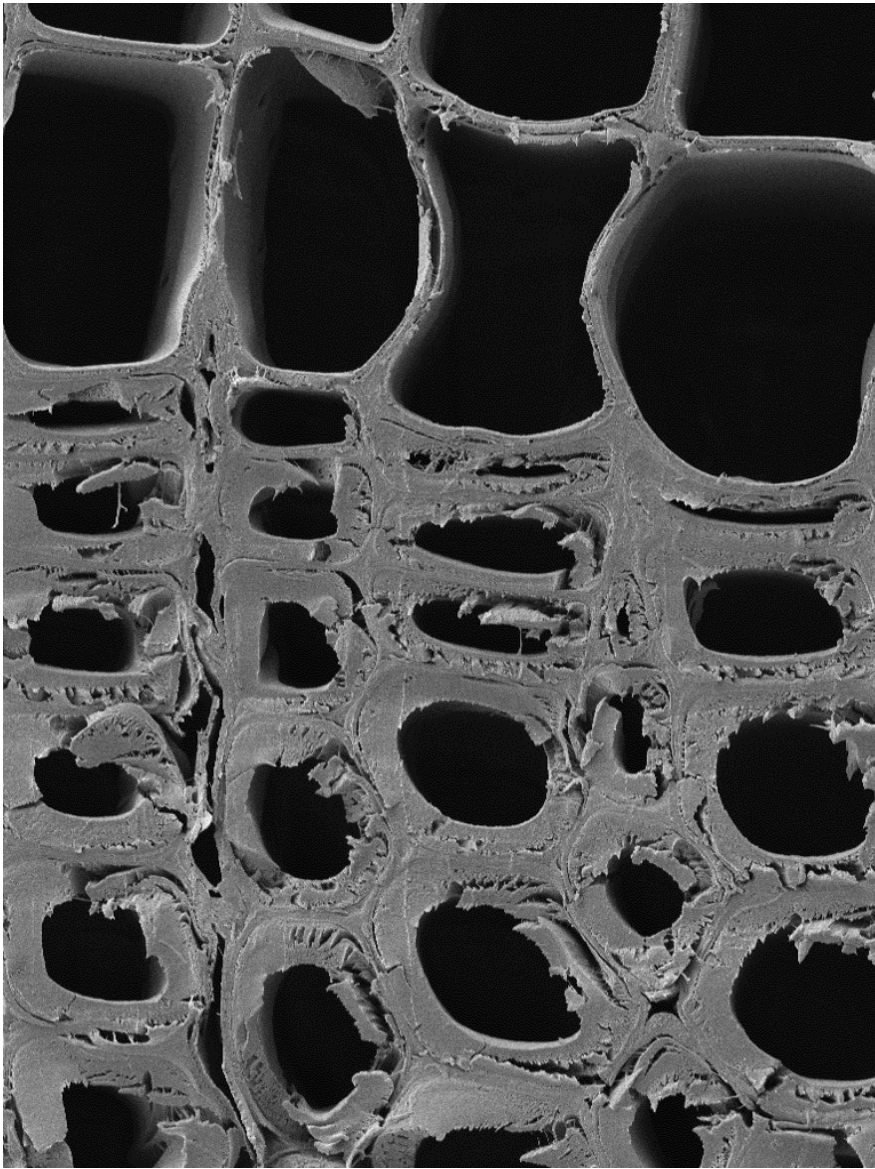


Figure V-12. Field-emission scanning electron microscope image
(cross section of dried and heat-treated larch wood, $\times 2,000$)

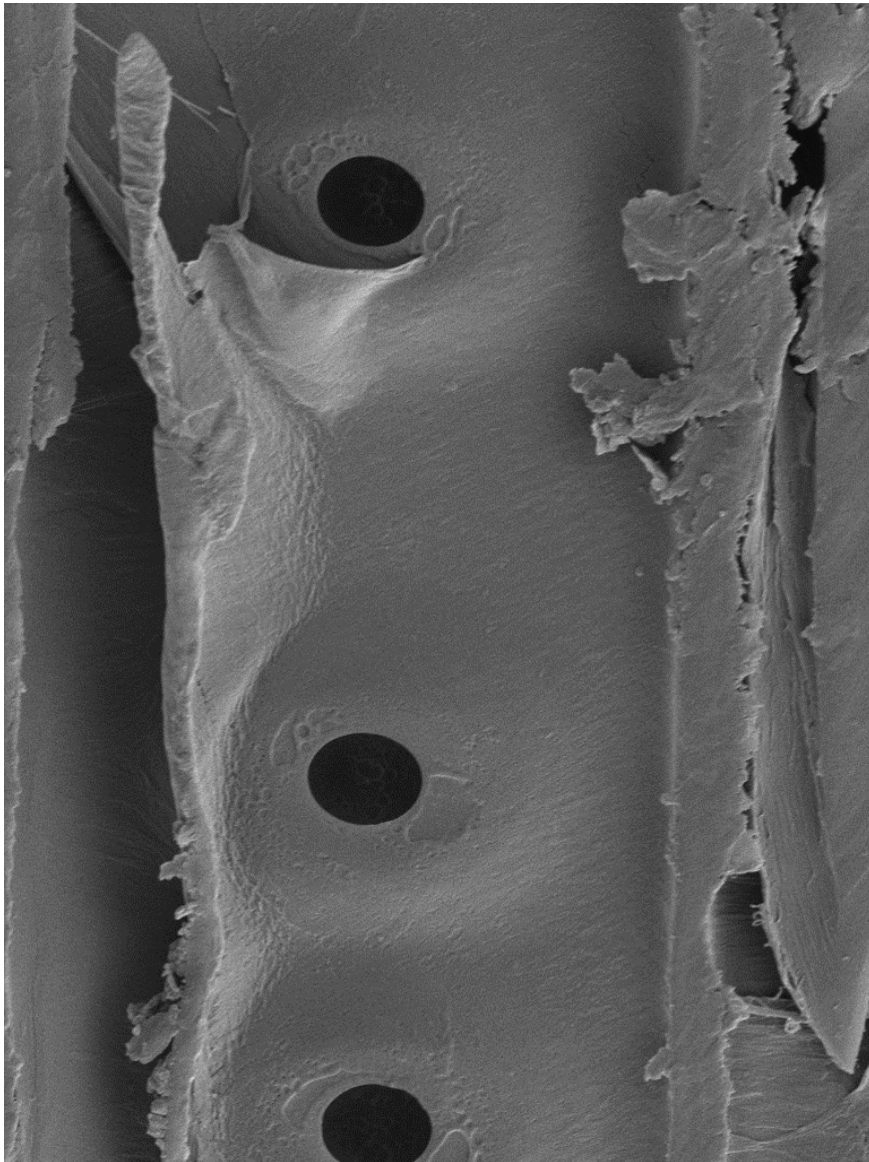


Figure V-13. Field-emission scanning electron microscope image
(radial section of non-treated larch wood, $\times 5,000$)

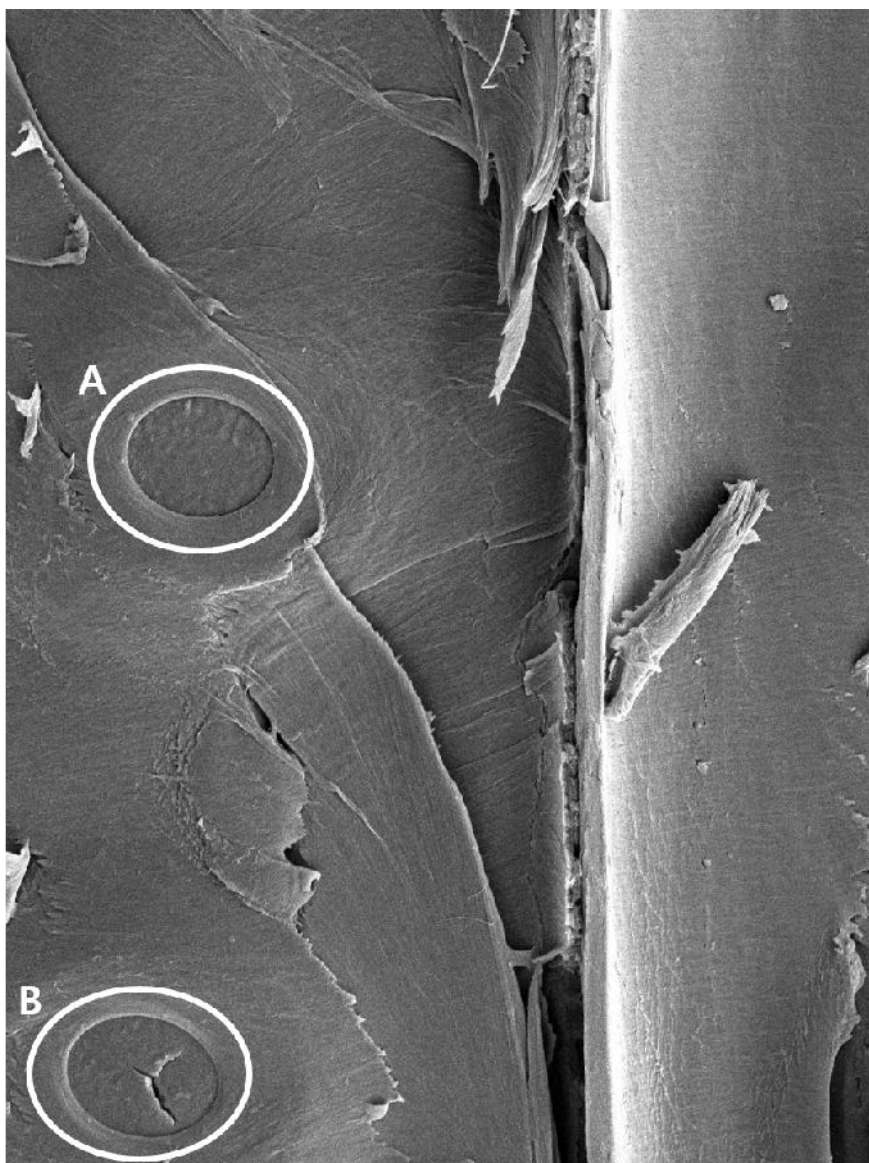


Figure V-14. Field-emission scanning electron microscope image
(radial section of dried and heat-treated larch wood, $\times 5,000$)

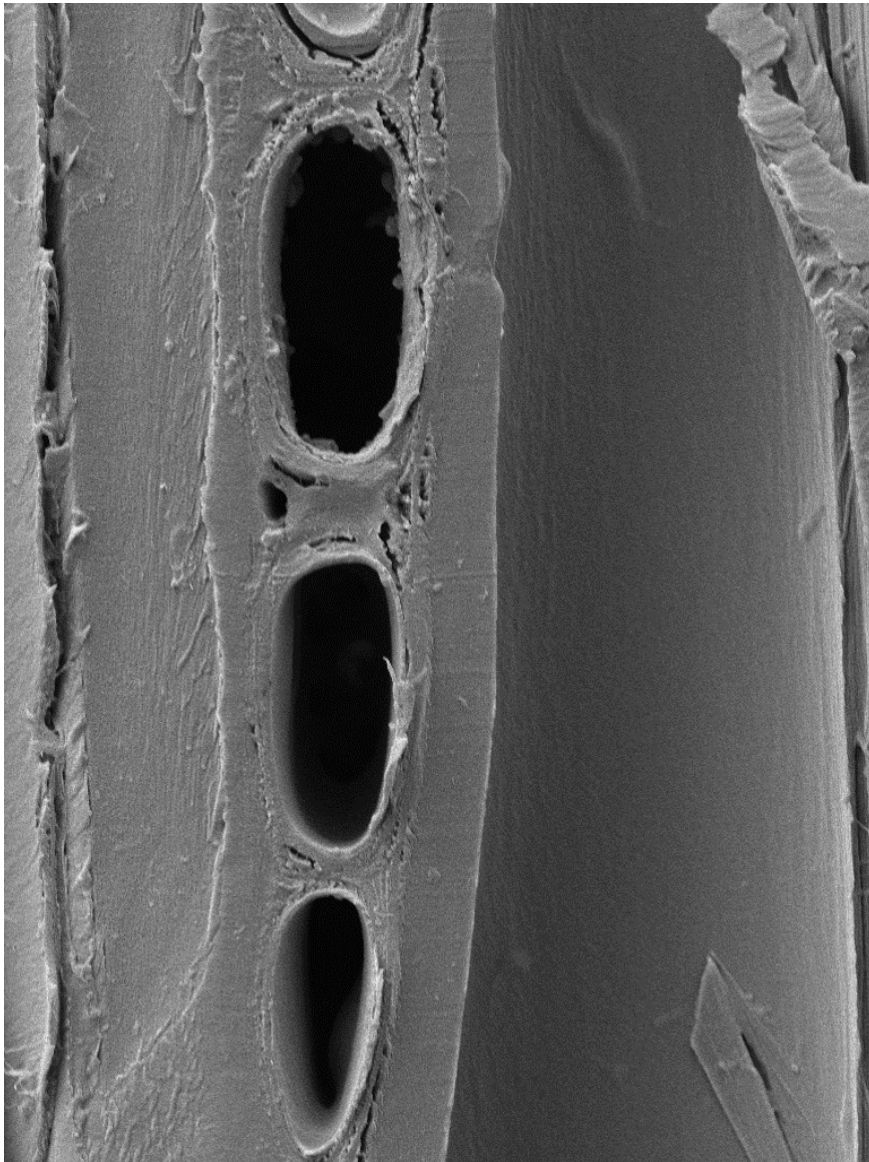


Figure V-15. Field-emission scanning electron microscope image
(tangential section of non-treated larch wood, $\times 5,000$)

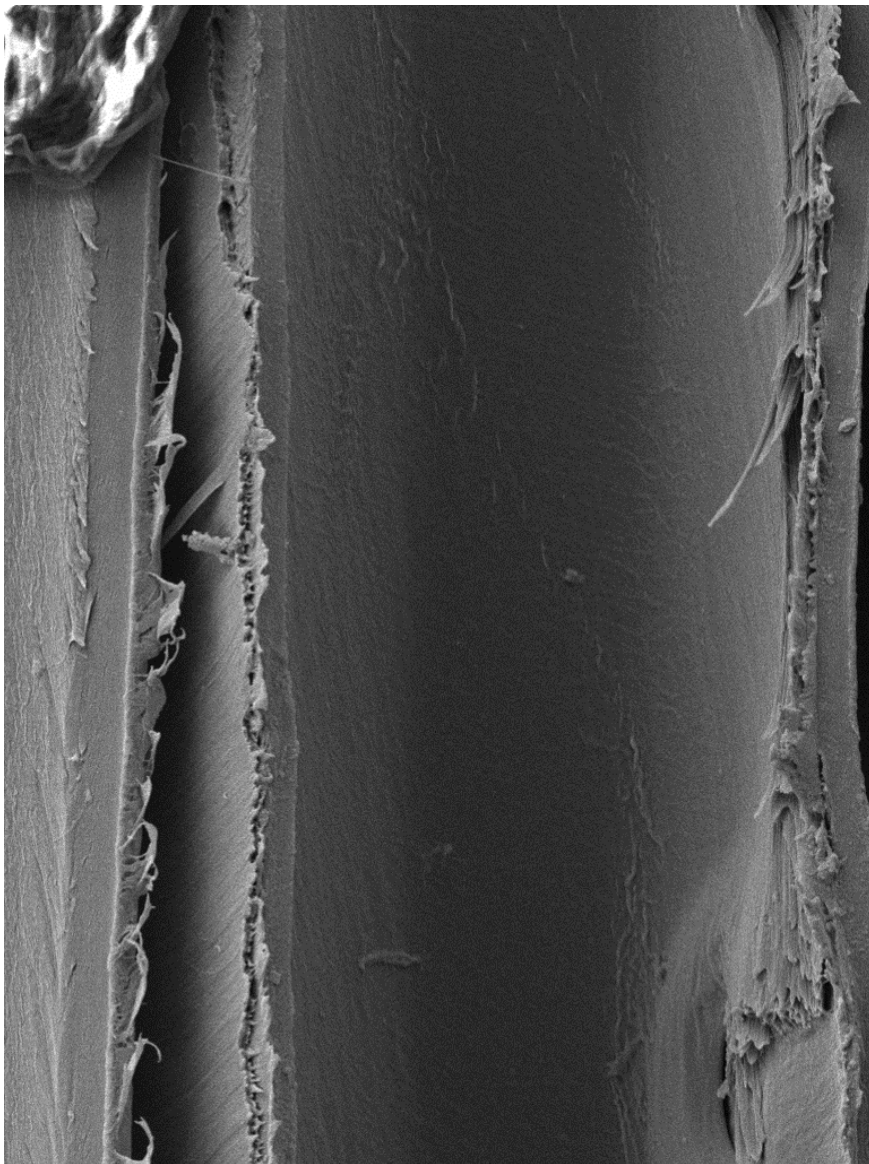


Figure V-16. Field-emission scanning electron microscope image
(tangential section of non-treated larch wood, $\times 5,000$)

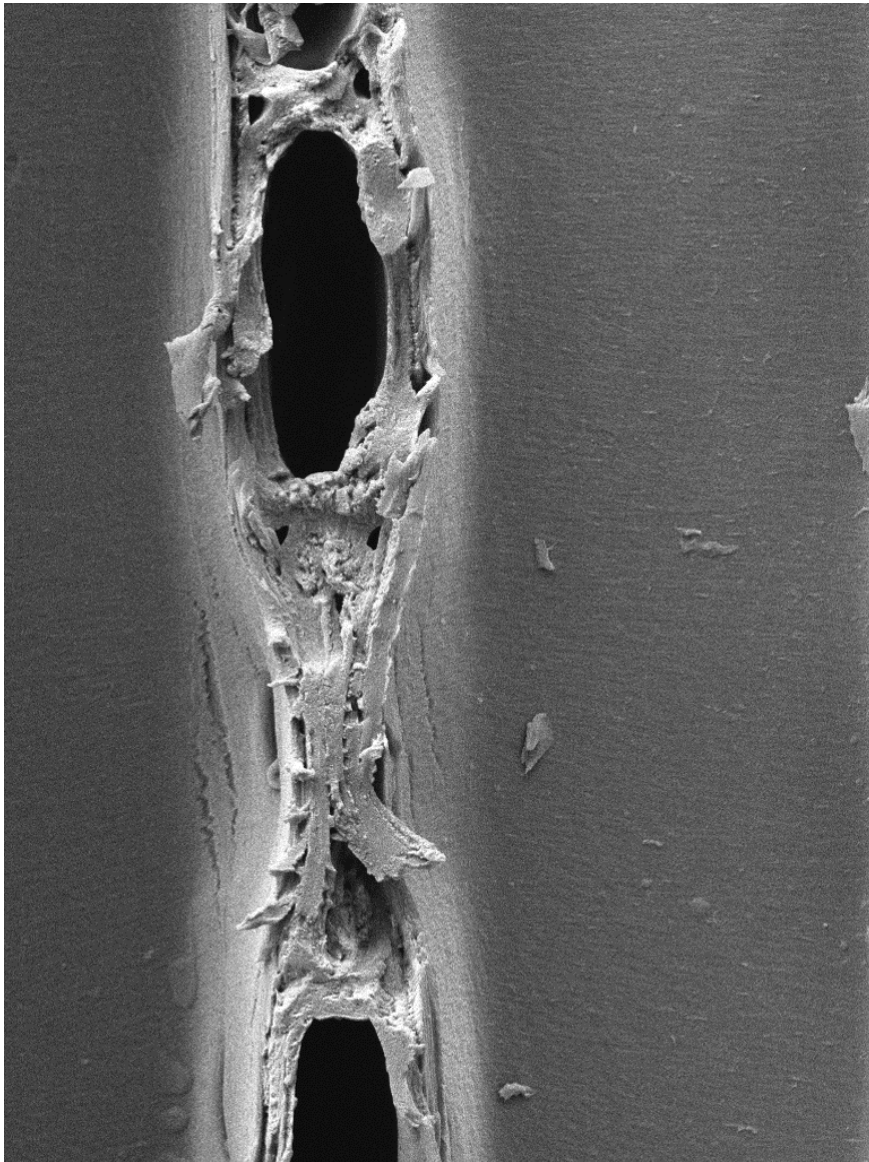


Figure V-17. Field-emission scanning electron microscope image
(tangential section of dried and heat-treated larch wood, $\times 5,000$)

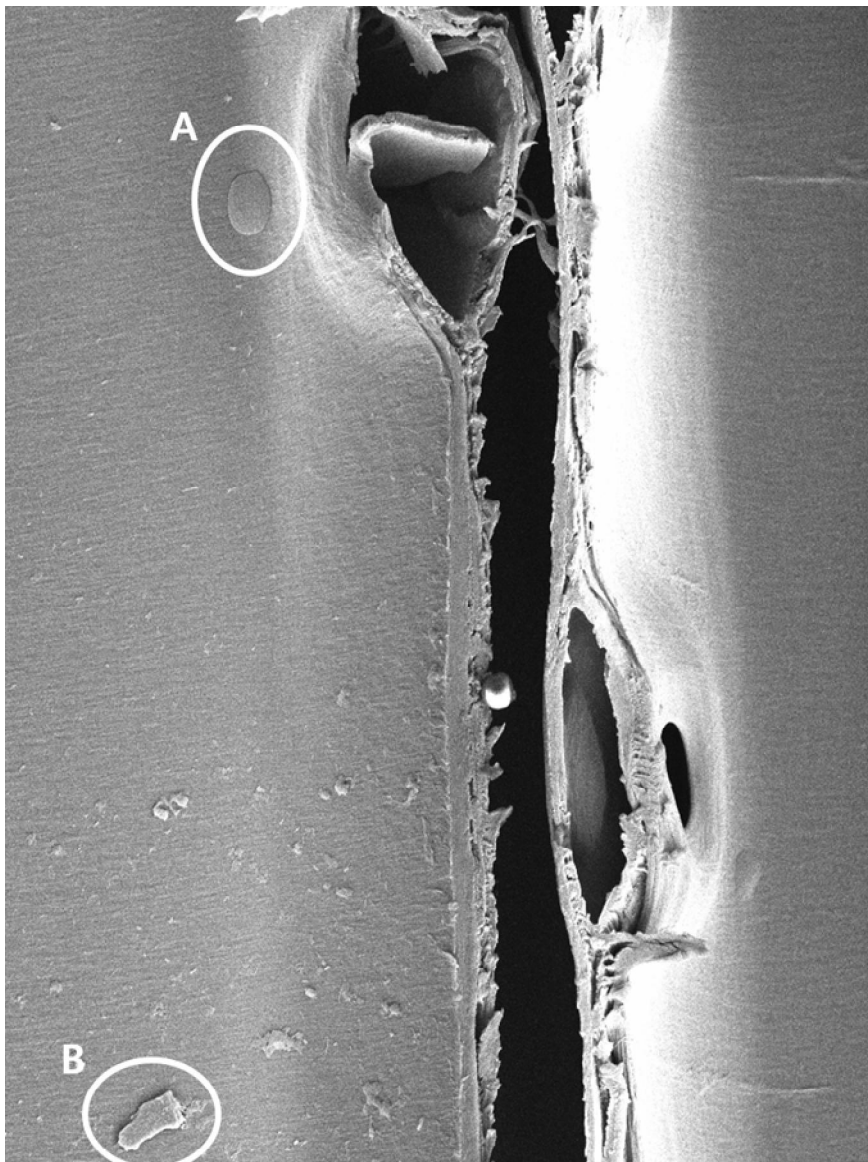


Figure V-18. Field-emission scanning electron microscope image
(tangential section of dried and heat-treated larch wood, $\times 5,000$)

3.3. 투과 전자 현미경 관찰 결과

Figure V-19와 Figure V-20은 무처리 낙엽송재의 횡단면을 투과 전자 현미경으로 각각 25,000배와 30,000배의 배율로 관찰한 것이고, Figure V-21과 Figure V-22는 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재의 횡단면을 투과 전자 현미경으로 각각 20,000배와 30,000배의 배율로 관찰한 것이다. 중간층-일차벽-이차벽 사이의 경계면이 무처리재에서는 깨끗하게 이어지는 반면에 과열증기 건조-열처리재에서는 불연속적으로 일그러지거나 끊어지는 현상이 발견된다. 이는 목재 내 수분이 제거됨에 따라 세포가 수축하면서 발생한 현상이거나 고온의 열처리에 의해 세포벽 구성성분 중 일부가 열분해되면서 발생한 현상인 것으로 생각된다. 또한 Figure V-23의 화살표와 같이 과열증기 건조-열처리재에서는 세포내강과 인접해있는 S3층이 S2층과 분리되는 현상이 발견되었다. 이는 S3층이 세포내강과 인접해 있기 때문에 고온의 영향을 많이 받을 뿐만 아니라 고온의 열처리에 의해 영향을 많이 받는 헤미셀룰로오스의 함량비가 다른 층에 비해 높기 때문인 것으로 생각되며, 이러한 결과로 세포 내벽과 인접한 층에서 미세한 결함(Figure V-23A)이나 뜯겨진 부분(Figure V-23B)이 발견되었다.



Figure V-19. Transmission electron microscope image
(cross section of non-treated larch wood, $\times 25,000$)

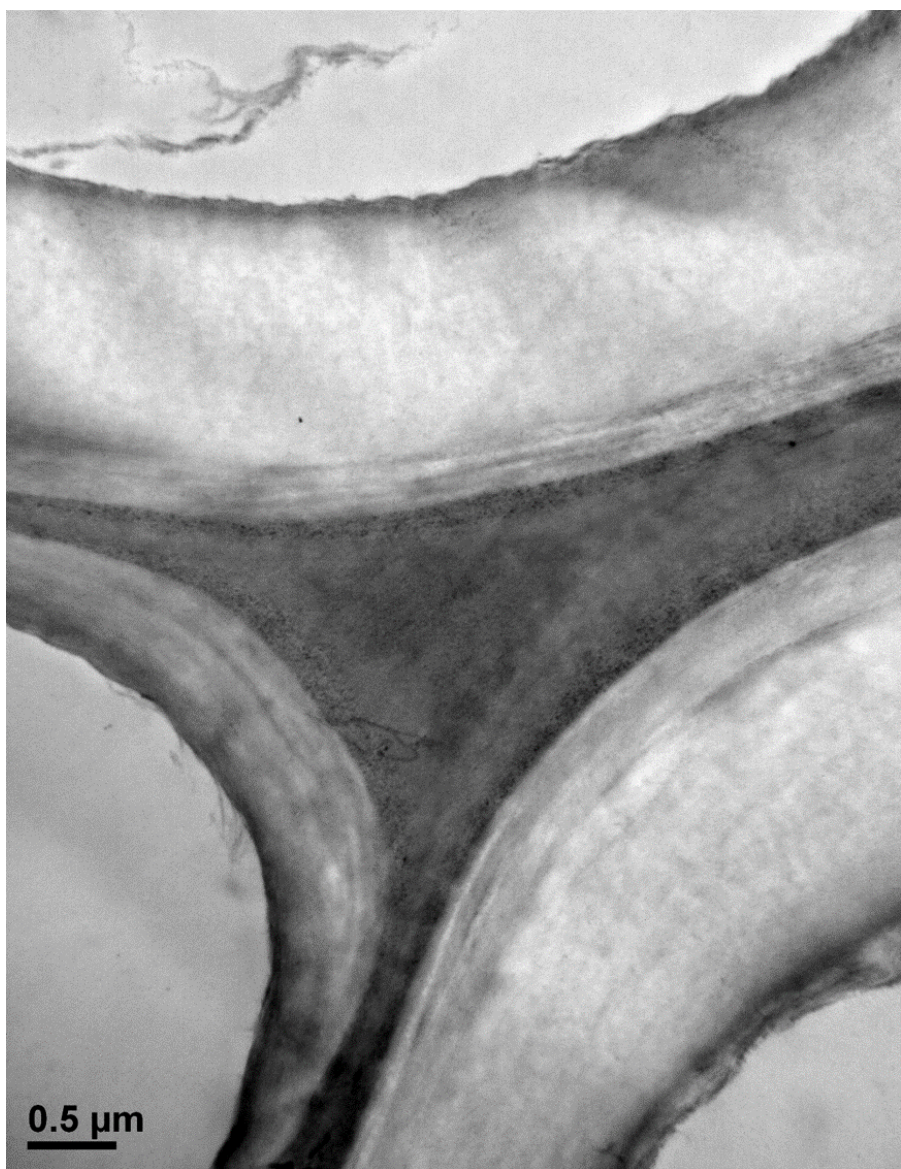


Figure V-20. Transmission electron microscope image
(cross section of non-treated larch wood, $\times 30,000$)

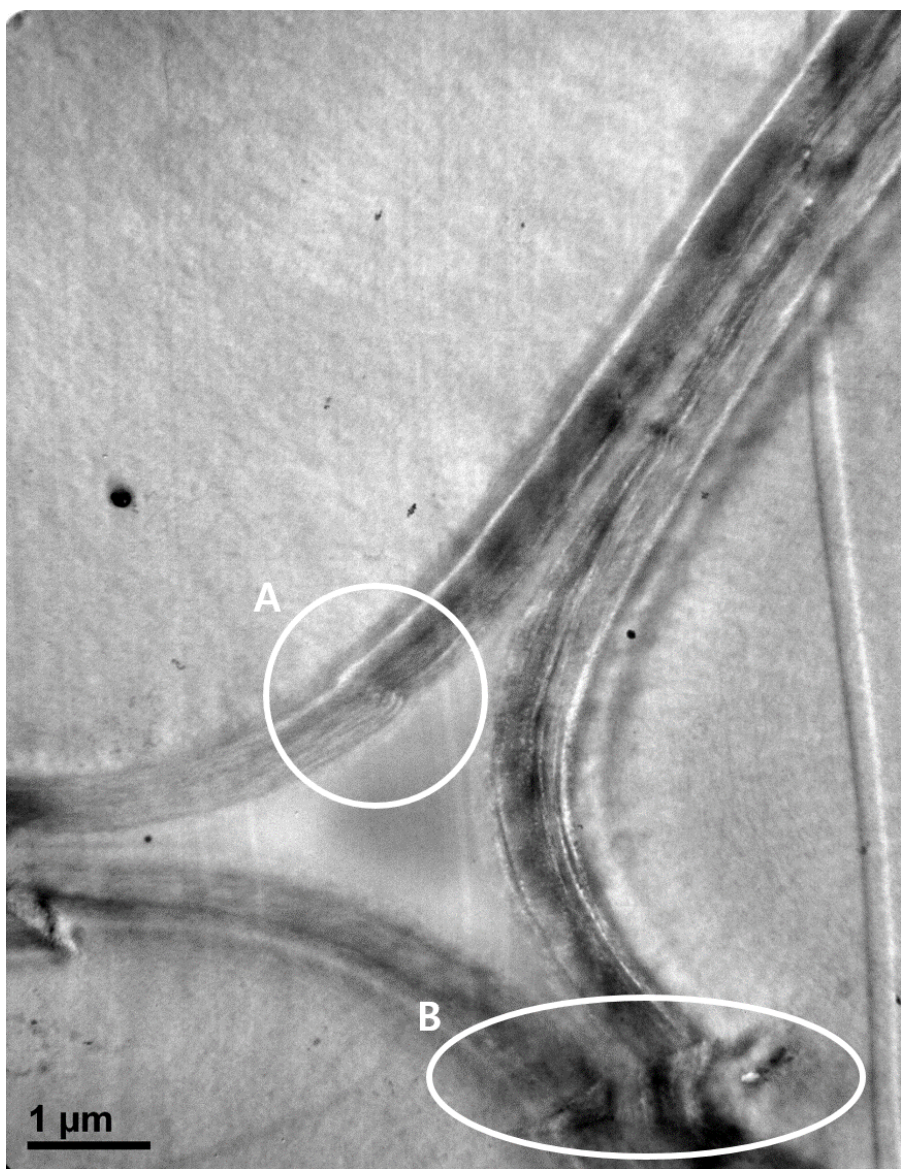


Figure V-21. Transmission electron microscope image
(cross section of larch wood dried and heat-treated using
superheated steam, $\times 20,000$)

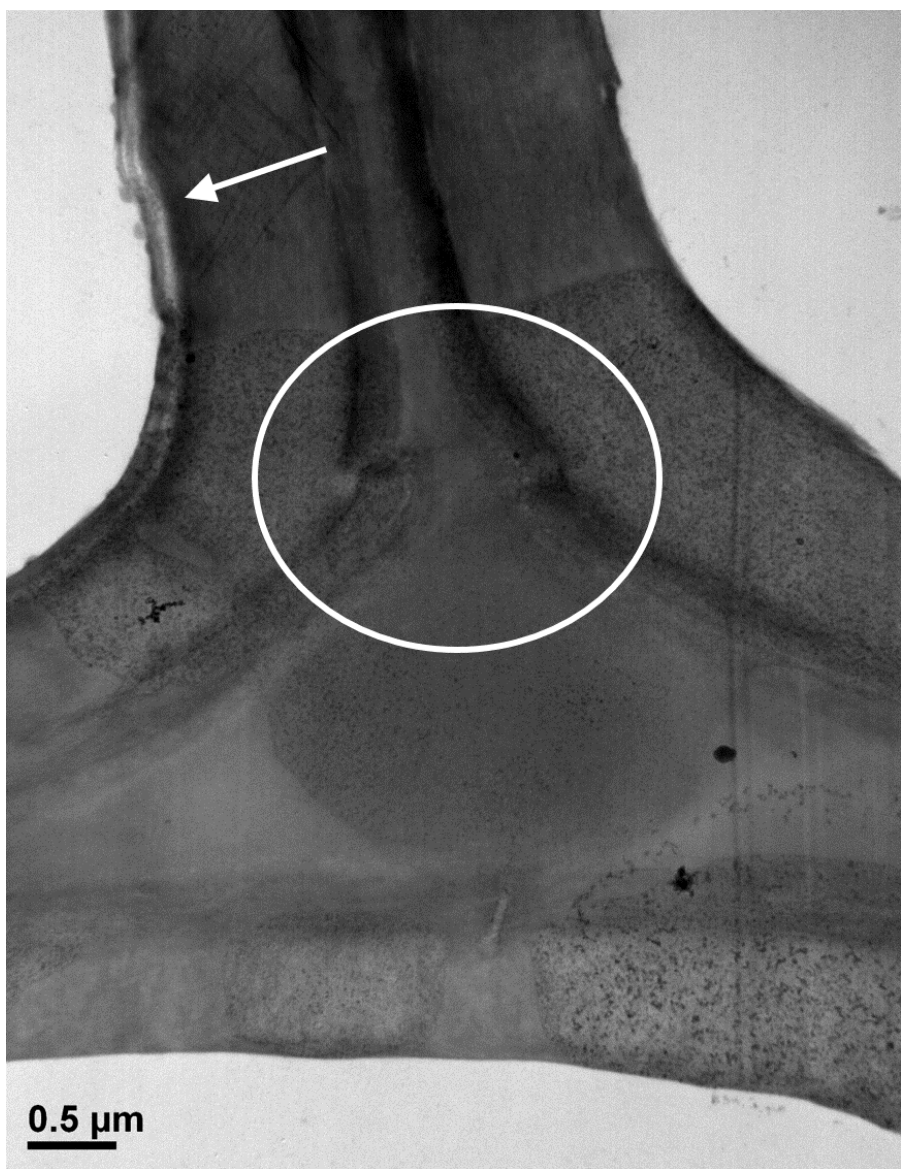


Figure V-22. Transmission electron microscope image
(cross section of larch wood dried and heat-treated using
superheated steam, $\times 30,000$)

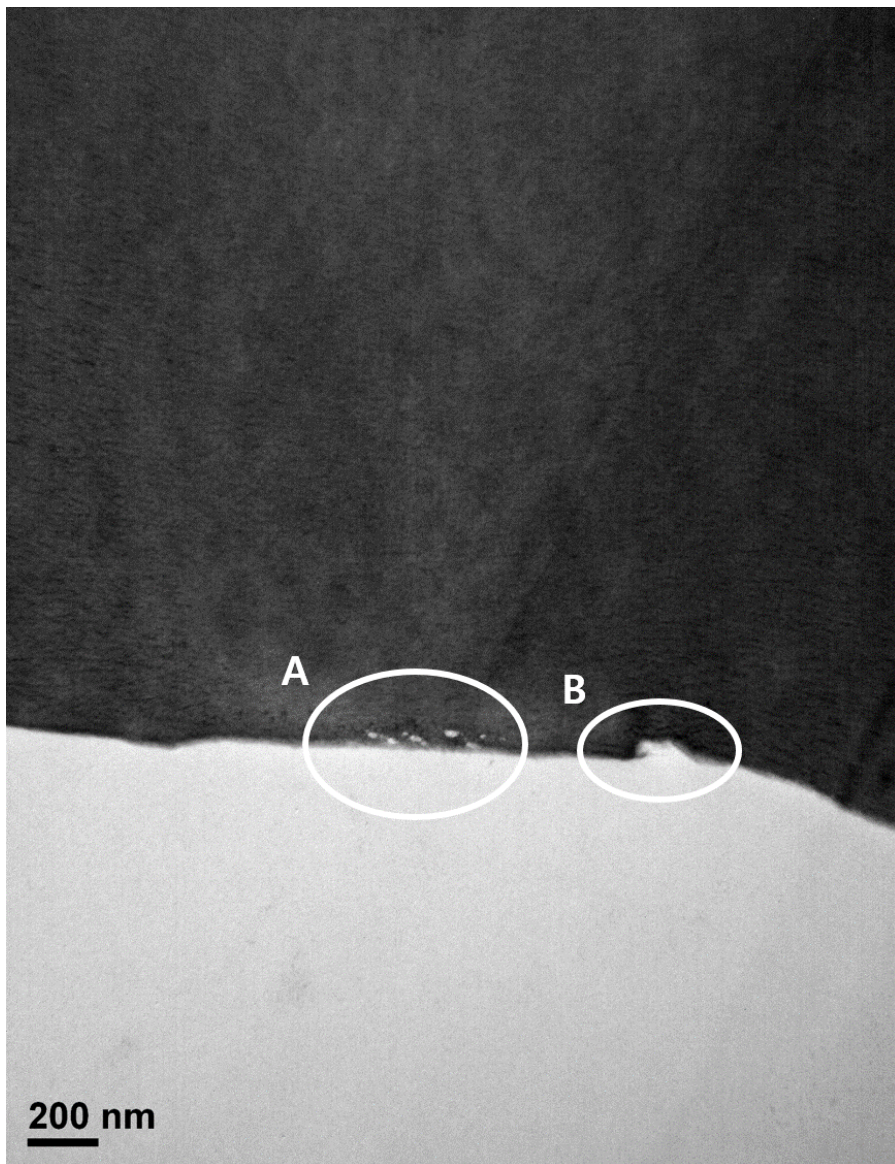


Figure V-23. Transmission electron microscope image
(cross section of larch wood dried and heat-treated using
superheated steam, $\times 60,000$)

4. 결론

본 장에서는 과열증기 건조-열처리에 의한 낙엽송재의 세포벽 구조 변화를 광학 현미경, 주사 전자 현미경 및 투과 전자 현미경을 통해 분석하였다.

광학 현미경으로 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재와 무처리 낙엽송재의 횡단면을 40배의 배율로 확인한 결과, 과열증기 건조-열처리에 의해 방사조직을 따라 할렬이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 방사단면과 접선단면을 100배의 배율로 확인한 결과, 과열증기 건조-열처리에 의한 세포벽 구조의 변화를 관찰하지 못 하였다.

주사 전자 현미경으로 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재와 무처리 낙엽송재를 확인한 결과, 2,000배의 배율로 확인한 과열증기 건조-열처리 낙엽송재의 횡단면에서는 무처리 낙엽송재의 횡단면에서와는 다르게 세포벽의 이차벽이 거칠게 절단된 것을 확인할 수 있었고, 각 층 사이의 경계면이 벌어지는 현상이 과열증기 건조-열처리재에서 더욱 두드러지게 나타났음을 확인할 수 있었다. 방사단면을 5,000배로 확인한 사진에서는 과열증기 건조-열처리에 의한 벽공 폐쇄와 폐쇄된 벽공의 토러스가 갈라진 것을 확인할 수 있었다. 또한, 접선단면을 5,000배로 확인한 사진에서는 횡단면과 같이 방사방향 세포들의 단면이 거칠게 절단된 것을 확인할 수 있었고, 가도관의 내벽에서 리그닌 방울이 맺혀 있는 것을 확인할 수 있었다.

투과 전자 현미경을 이용하여 과열증기 건조-열처리된 낙엽송재와 무처리 낙엽송재의 횡단면을 확인한 결과, 고온의 과열증기 건조-열처리에 의한 세포벽 수축 또는 세포벽 구성 성분의 열분해에 의한 결과로 중간층-일차벽-이차벽 사이의 경계면이 휘어지거나 끊어지는 등의 불연속 구간이 나타났음을 확인할 수 있었고, 고온의 열처리에 의해 S3층에서 미세한 결함이나 뜯어진 부분과 같이 손상된 부분이 발견되었다.

제 6 장

포화-과열증기를 이용한
낙엽송 정각재 연속 건조 공정 중
목재 내 건조 응력 분석

1. 서론

최근 한옥의 건축과 사용에 대한 관심이 증가하고, 목조 문화재의 수리 및 보존에 관련한 문제가 사회적으로 대두되면서 대단면 목재의 수요가 증가하고 있다. 하지만 대단면 목재는 수분 이동 거리가 길고, 소·중경목이 대부분인 국산 목재의 공급 구조상 대단면 목재에는 수나미성숙재가 포함될 가능성이 매우 높아 건조 중 할렬이 발생할 가능성이 매우 높다. 할렬은 건축물의 안정성에 크게 영향을 미치기 때문에 할렬이 발생하지 않도록 건조하는 것은 매우 중요하다.

본 장에서는 소경 정각재를 할렬 발생 없이 건조하기 위해 과열증기를 적용하고자 한다. 또한 과열증기 건조에 앞서 포화증기를 이용한 건조 방법을 적용하고자 한다. 포화증기는 증발하는 분자의 수와 반대로 액체나 고체 속으로 들어오는 기체 분자의 수가 같아져서 외관상으로는 변화가 없는 평형 상태의 기체를 말한다(Figure VI-1).

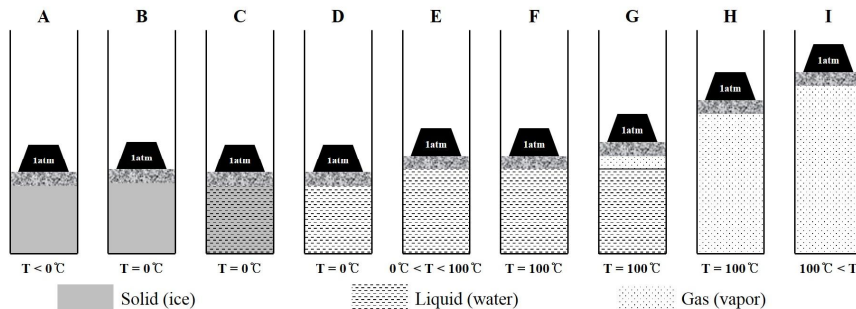


Figure VI-1. Phase change of water with temperature change (Ro, 2008)

포화증기는 상대습도가 100%이기 때문에 목재의 평형함수율은 섬유 포화점이 된다. 또한 목재는 섬유포화점 이하로 수분이 감소할 때 수축하는 것으로 알려져 있고, 고온에서는 목재의 평형함수율 및 섬유포화점이 상온에서의 평형함수율 및 섬유포화점보다 낮은 것으로 알려져 있다(Figure VI-2). 즉, 고온의 포화증기 내에서 목재가 건조될 때, 목재 표면은 상대적으로 높은 함수율의 섬유포화점까지만 건조되고, 수축이 발생하지 않을 것으로 생각된다. 또한 목재 내부의 자유수는 목재 표면으로 이동하면서 목재 표면과 내부의 함수율 차이가 줄어드는 채로 초기 건조가 이루어질 것으로 생각된다.

이에 따라 본 장에서는 고온의 포화증기를 이용하여 표면과 내부 사이의 함수율 차이가 작게 유지된 채로 건조시킨 다음, 바로 이어서 과열증기를 이용하여 급격히 건조하는 포화-과열증기 연속 건조 공정의 가능성을 시험해보고자 한다. 또한 할렬이 발생하지 않는 적정 건조 스케줄을 결정하기 위하여 목재 내부에서 발생하는 건조 응력을 정량적으로 평가하고자 한다.

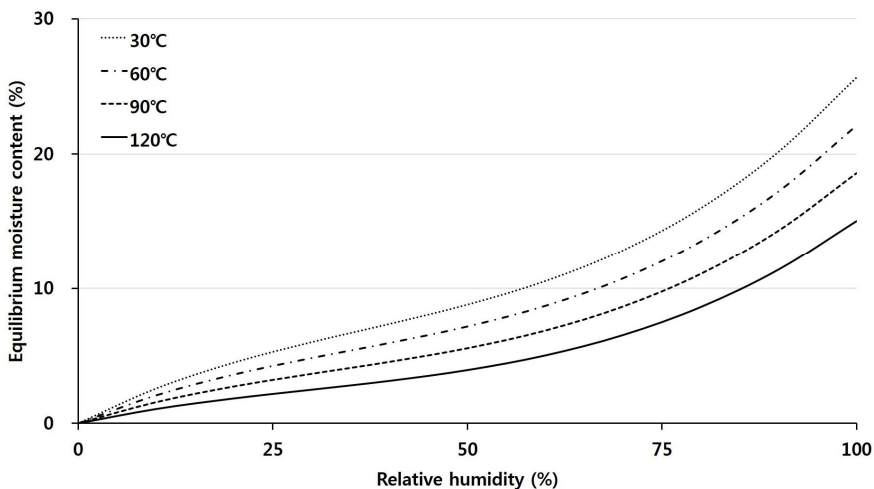


Figure VI-2. Equilibrium moisture content of wood versus humidity and temperature according to the Hailwood-Horrobin equation

2. 재료 및 방법

2.1. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조

포화증기 및 과열증기를 이용한 각재 연속 건조 공정에 사용된 낙엽송은 폭과 두께가 0.1 m이고 길이가 2.7 m인 각재에서 가운데 2 m를 건조 시편으로 사용하였고, 건조 시편의 양쪽 20 mm는 초기함수율 측정용 시편으로 사용하였다(Figure VI-3).

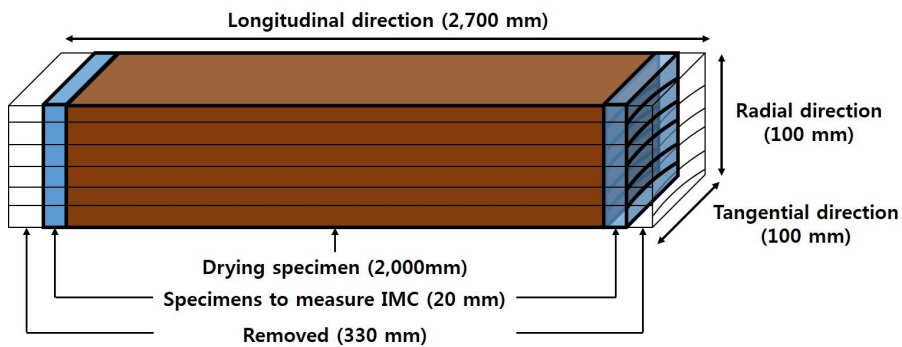


Figure VI-3. Preparation of the timber specimen for the continuous drying process using saturated and superheated steam

포화증기와 과열증기를 이용한 낙엽송 각재 연속 건조는 목재 내 자유수 제거를 위해 24시간동안 대기압(0.1 MPa)에서 100℃ 조건의 포화증기에서 건조를 수행한 다음, 바로 이어서 0.5 MPa, 220℃ 조건의 과열증기에서 42시간동안 건조하였다. 과열증기 건조는 과열증기의 온도가 서서히 상승되는 온도 상승 구간(40시간)과 과열증기의 온도가 최고점에서 일정하게 유지되는 집중 열처리 구간(2시간)으로 구분된다. 66시간의 포화-과열증기 연속 건조가 종료된 후, 건조된 낙엽송 각재는 반응기 내부에서 12시간동안 서서히 냉각되었다. 결과적으로 포화-과열증기를 이용한 낙엽송 각재 연속 건조 공정은 총 78시간이 소요되었다.

2.2. 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 내부 함수율 분포 변화 및 유변학적 거동 변화 분석

포화-과열증기 연속 건조 공정은 밀폐된 반응기 내에서 건조가 이루어지기 때문에 건조가 진행되는 동안 하나의 각재에 대한 내부 함수율 분포와 건조 응력 변화를 연속적으로 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 초기 함수율이 유사한 낙엽송 각재를 설정된 시간까지 동일한 조건으로 포화-과열증기 연속 건조한 다음, 내부 함수율 분포와 건조 응력을 측정하였다. 측정 시점은 24시간의 포화증기 건조 구간에서는 6시간 단위로 네 번의 측정 시점(6시간, 12시간, 18시간, 24시간)을 설정하였다. 42시간의 과열증기 건조 구간에서는 과열증기의 온도를 서서히 상승시키는 40시간 동안 10시간 단위로 네 번의 측정 시점(34시간, 44시간, 54시간, 64시간)과 과열증기 건조가 끝나는 시점(66시간)을 포함하여 다섯 번의 측정 시점을 설정하였다. 그리고 모든 공정이 종료된 시점(78시간)을 포함하여 전체 공정 내에서 총 열 번의 측정 시점을 설정하였다.

Figure VI-4는 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 각재 내부 함수율 분포 및 건조 응력 변화 분석을 위한 시편 제작 방법을 나타낸 그림이다. 각각의 설정된 시간까지 2 m 길이의 낙엽송 정각재를 건조한 다음, 용이와 같은 결함이 없는 각재의 가운데에서 두께(섬유방향) 20 mm인 시편을 4개 떼어냈다(Figure VI-4에서 좌측부터 순서대로 A, B, C, D).

A시편과 D시편은 각재 전체의 평균 함수율 측정을 위한 시편으로 두 시편의 평균 함수율을 각재 전체의 평균 함수율로 가정하였다.

B 시편은 각재의 횡단방향 함수율 분포 측정을 위한 시편으로 그림과 같이 25등분하여 각각의 조각 시편의 함수율을 측정하였다.

C 시편은 슬라이스법을 이용한 건조 응력 측정을 위한 시편으로 수에

서 가장 먼 쪽의 접선단면 표면부터 표면층(surface layer), 내부층(inner layer), 중심층(core layer)으로 구분하여 락톱(band saw)으로 3 mm 두께의 슬라이스 시편을 제작하였다. 정각재는 판재와는 다르게 폭 방향과 두께 방향의 수분 이동 거리가 같기 때문에 각재 중심을 기준으로 같은 거리에서는 함수율 변화가 유사하게 나타날 것으로 판단되어 슬라이스 시편의 길이를 층에 따라 다르게 제작하였다. 즉, 표면층의 슬라이스 시편은 100 mm, 내부층의 슬라이스 시편은 70 mm, 중심층의 슬라이스 시편은 40 mm 길이로 제작하였다. 먼저 접선 단면에서 3 mm 두께의 표면층 슬라이스 시편을 떼어낸 후에 접선단면에서 20 mm, 방사 단면의 양쪽에서 15 mm를 제거하였다. 다시 접선단면에서 3 mm 두께의 내부층 슬라이스 시편을 떼어낸 후에 접선단면에서 20 mm, 방사 단면의 양쪽에서 15 mm를 제거하였고, 마지막으로 접선 단면에서 3 mm 두께의 중심층 슬라이스 시편을 떼어내었다.

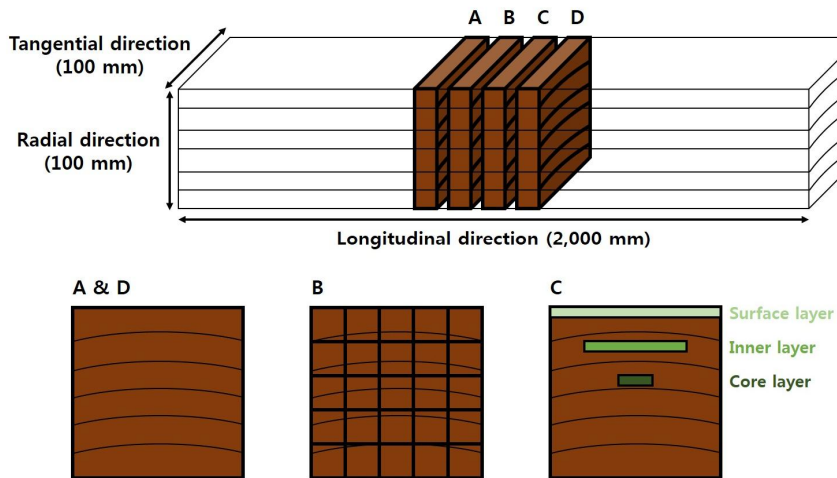


Figure VI-4. Preparation of the specimens to measure internal moisture content distribution and to analyze drying stress in the square timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam

2.3. 자유 수축률 결정

자유 수축량은 건조 응력이 없는 상태에서 목재의 수분이 감소할 때, 목재가 최대 수축할 수 있는 양을 의미한다. 하지만 실제로 목재가 건조될 때는 인접한 세포에 의해 건조 응력이 존재하기 때문에 실험적으로 자유 수축량 또는 자유 수축률을 결정하는 것은 거의 불가능하다. 한(2014)은 건조 과정 중 작고 얇은 크기의 시험편에 전체적으로 수분이 균일하게 분포하면 건조 중 발생하는 건조 응력을 최소화할 수 있을 것으로 보고, 1 mm 두께의 얇은 시험편의 수축률을 자유 수축률로 가정하였다. 이에 따라 Figure VI-4의 C시험과 같이 슬라이스 시험의 위치와 동일한 위치에서 두께 1 mm인 얇은 시험편을 10개씩 제작하여 생재에서부터 전건까지 서서히 건조시키면서 전 수축률을 측정하고, 이를 자유 수축률이라고 가정하였다. 각 위치에서 측정된 전 자유 수축률은 Table VI-1과 같다. 각 층 별에 따라 수축률이 차이가 나는 이유는 각 층 별로 섬유배열이 다르기 때문이다. 즉, 표면층보다는 내부층과 중심층이 수축률이 작은 방사방향의 비율이 높기 때문에 중심층에서의 수축률이 가장 작게 나타났다. 함수율과 수축 및 팽윤과의 관계는 섬유포화점 이하의 함수율 범위에서는 대체로 직선관계를 나타내기 때문에 섬유포화점 이하의 함수율을 갖는 슬라이스 시험의 자유 수축률은 함수율에 대한 일차함수 형태를 갖는 것으로 가정하였다(강 등, 2008).

Table VI-1. Total free shrinkage from green to oven-dry at each layer

	Surface layer	Inner layer	Core layer
Total free shrinkage from green to oven-dry	8.3%	7.5%	5.6%
(Standard deviation)	(1.1%)	(0.9%)	(0.8%)

2.4. 슬라이스 시편 변형량의 구분 및 건조 응력 산출

건조 중 제작된 슬라이스 시편의 치수 변화는 Figure VI-5로 표현할 수 있다(한, 2014). 슬라이스 시편은 생재 상태에서 각재의 폭 방향 길이(L_0), 실제 건조 중 수분 감소에 의해 수축한 각재의 폭 방향 길이(= 슬라이스 시편 제작을 위해 떼어낸 시편의 폭 방향 길이, L_1), 3 mm 두께의 슬라이스 시편 제작 직후 순간적으로 변화된 슬라이스 시편의 폭 방향 길이(L_2), 폴리프로필렌 필름과 알루미늄 호일을 이용하여 슬라이스 시편을 밀봉해 함수율 변화가 없는 상태에서 시간이 경과함(7 일)에 따라 응력이 완화되면서 변형된 길이(L_3) 등 네 시점에서의 길이를 측정하였다. 또한 앞 절에서 결정된 자유 수축률을 적용한 각재의 폭 방향 최대 수축 길이를 생재 상태에서 각재의 폭 방향 길이로부터 제한 값(L_4)을 계산하였다.

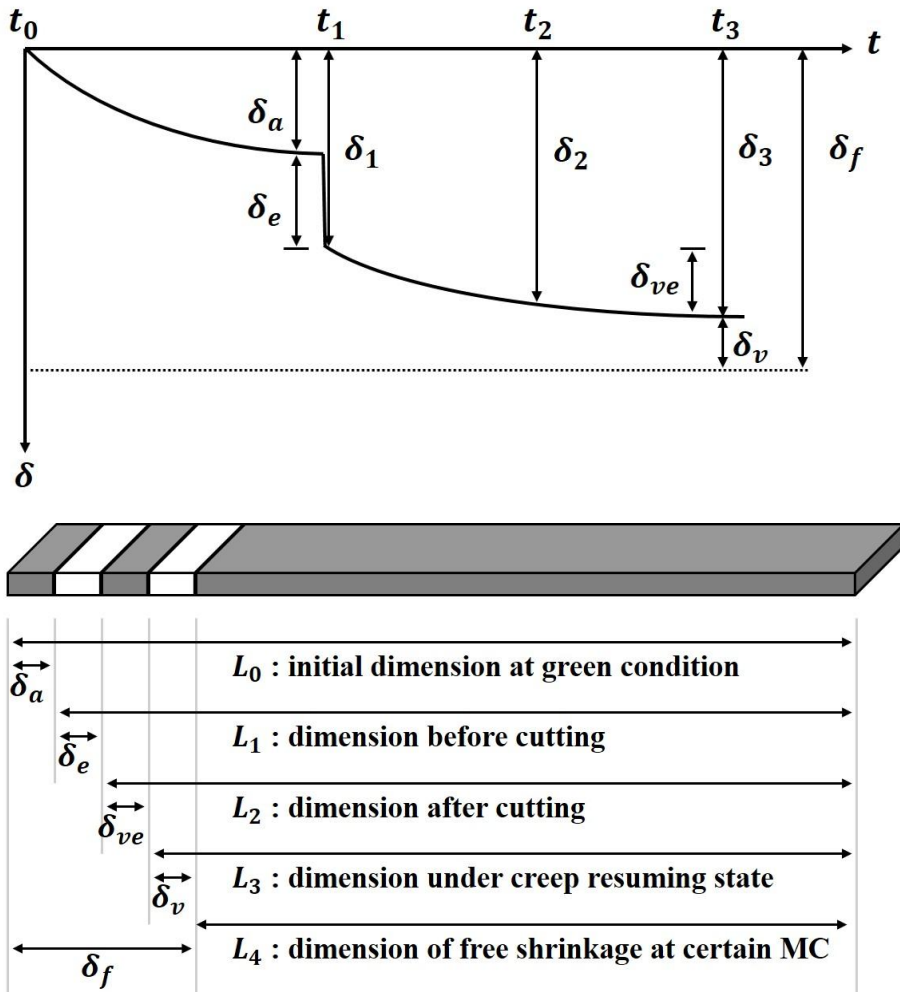


Figure VI-5. Dimensional changes of slice during the drying process
(Han, 2014)

슬라이스의 길이 측정은 디지털 이미지 분석 기법을 적용하여 측정하였다. 디지털 이미지 분석 기법은 버니어 캘리퍼스에 의한 길이 측정보다 높은 정밀도로 측정이 가능하고, 획득한 이미지를 통해 반복 측정이 가능하다는 장점이 있다(박 등, 2015A). 또한 슬라이스 시편이 매우 얇기 때문에 버니어 캘리퍼스를 이용하여 길이를 측정할 경우, 외력에 의해 길이 측정 결과가 왜곡될 가능성이 있다. 분석용 이미지 측정은 디지털 카메라(EOS-50D, Cannon, Tokyo, Japan)를 이용하였다. Figure VI-6과 같이 시편 거치대 위에 길이 측정을 위한 시편을 올려놓고 이미지를 획득하였다. 이미지가 촬영되는 시편의 표면에 길이 측정의 기준이 될 자를 올려놓고 이미지를 획득하였다. 획득한 이미지는 픽셀 단위로 크기가 결정되고, 길이 측정의 기준이 되는 자의 길이(10 mm)의 픽셀 수와 시편의 픽셀 수에 대한 비율로서 시편의 길이를 측정하였다.



Figure VI-6. Digital camera stand for measuring length of the slice

각 시점에서 측정된 다섯 가지 길이를 식 VI-1부터 식 VI-5에 적용하여 자유 수축률(ε_f), 수분 감소에 따른 실제 수축률(ε_a), 탄성 변형률(ε_e), 점탄성 변형률(ε_{ve}) 및 점성 변형률(ε_v)을 계산하였다(Han *et al.*, 2017).

$$\varepsilon_f = \frac{(L_0 - L_4)}{L_0} = \frac{\delta_f}{L_0} \quad (\text{Eq. VI- 1})$$

$$\varepsilon_a = \frac{(L_0 - L_1)}{L_0} = \frac{\delta_a}{L_0} \quad (\text{Eq. VI- 2})$$

$$\varepsilon_e = \frac{(L_1 - L_2)}{L_1} = \frac{\delta_e}{L_1} \quad (\text{Eq. VI- 3})$$

$$\varepsilon_{ve} = \frac{(L_2 - L_3)}{L_1} = \frac{\delta_{ve}}{L_1} \quad (\text{Eq. VI- 4})$$

$$\varepsilon_v = \frac{(L_3 - L_4)}{L_1} = \frac{\delta_v}{L_1} \quad (\text{Eq. VI- 5})$$

건조 중 목재의 응력을 측정하기 위해서는 탄성 변형률과 탄성계수가 필요하다(Ugolev and Skuratov, 1992). 1차원의 선형 탄성에 기초하여 목재 건조 중 발생하는 응력을 산출하였다(Eq. VI-6). 탄성계수는 인장 시험을 통해 구한 값을 건조 중 슬라이스 시편의 온도와 함수율에 맞게 보정하여 사용하였다.

$$\sigma = \varepsilon_e \cdot E \quad (\text{Eq. VI- 6})$$

여기에서, σ 는 건조 응력(MPa), E 는 탄성계수(MPa)를 의미한다.

2.5. 낙엽송재의 접선방향 인장강도 및 인장탄성계수 측정

접선방향 인장강도와 인장탄성계수를 측정하기 위하여 한국 산업 규격의 『목재의 인장 시험 방법』에 따라 폭 30 mm (방사방향), 두께 20 mm (섬유방향), 길이 150 mm (접선방향) 크기의 직육면체 시편을 제작한 다음 Figure VI-7과 같이 길이 방향으로 가운데에서 70 mm 길이와 폭 10 mm 크기만큼 등글게 깎아낸 시편을 20개 제작하였다. 제작된 시편은 20℃의 온도와 65%의 상대습도로 설정된 항온항습기에서 조습시켰다. 인장 시험은 만능강도시험기(10-ton-UTM, Zwick, Germany)를 이용하여 3 mm/min의 속도로 수행하였다.

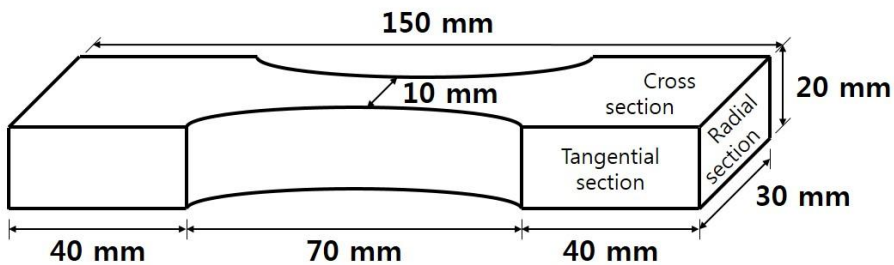


Figure VI-7. Specimens for measuring tensile strength of larch wood in tangential direction

실험 중 측정된 인장강도 시험편의 최대 하중으로부터 인장강도(σ_t)를 Eq. VI-7에 따라 계산하였다.

$$\sigma_t = \frac{P_{\max}}{A} \quad (\text{Eq. VI- 7})$$

여기에서, P_{\max} 는 최대 하중(N), A 는 인장 시험편의 단면적(mm²)을 의미한다.

접선방향 인장 탄성계수(E_t)는 비례한도 내에서의 하중과 변형의 관계 (Figure VI-8)로부터 Eq. VI-8을 이용하여 계산하였다.

$$E_t = \frac{P_l \cdot l}{\Delta_l \cdot A} \quad (\text{Eq. VI- 8})$$

여기에서 P_l 은 비례한도 내에서 상한 하중과 하한 하중의 차이(N), l 은 표점 거리(mm), Δ_l 은 P_l 에 대한 인장 변형(mm)을 의미한다.

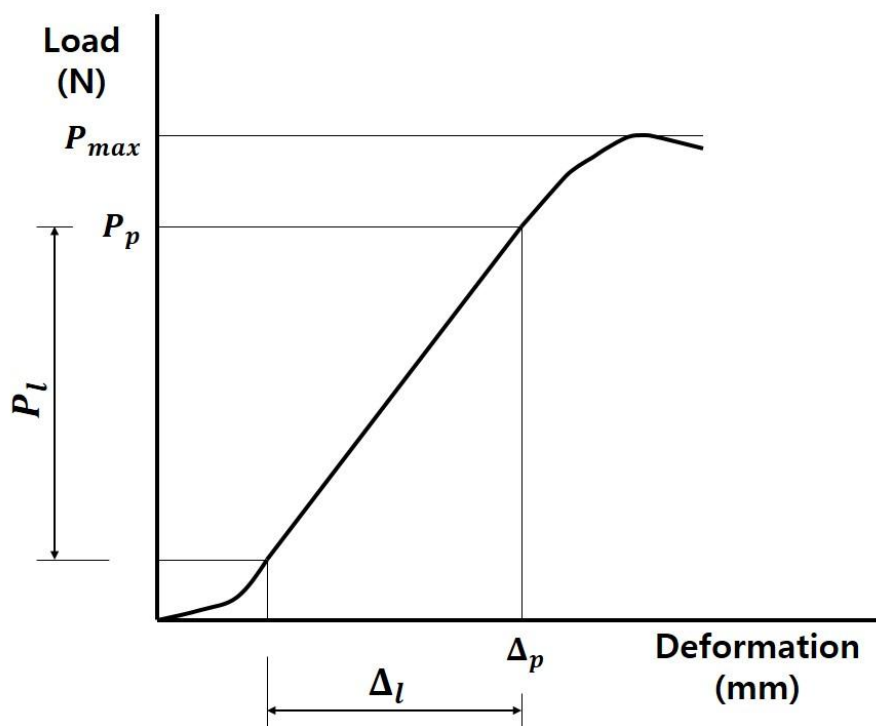


Figure VI-8. Load-deformation diagram of tensile test

3. 결과 및 고찰

3.1. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조

Figure VI-9는 78시간의 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 반응기 내부 증기와 각재 내부의 온도 및 반응기 내부 증기의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 24시간의 포화증기 건조가 진행되는 동안 반응기 내부 증기는 0.08~0.09 MPa의 압력에서 100~110°C의 온도 범위를 가졌다. 0.08 MPa에서 수증기의 포화온도가 약 93°C이고, 0.09 MPa에서 수증기의 포화온도가 약 97°C인 것을 고려하면 포화증기 건조가 진행되는 동안 반응기 내부는 포화증기보다 약간 높은 온도를 유지했음을 알 수 있다. 포화증기 건조가 종료되고 바로 이어서 히터가 재가동되면서 반응기 내부 증기의 온도와 압력은 다시 상승했다. 40시간 동안 과열증기의 온도를 220°C까지 서서히 상승시킨 다음 2시간 동안 유지시켰다. 이때 낙엽송 정각재 내부 온도는 과열증기의 온도 상승에 따라 증가하다가 약 50시간의 시점부터 약 160°C의 온도를 유지하였다. 0.5 MPa에서 수증기의 포화온도가 약 152°C임을 고려하면, 온도가 일정해지는 구간은 정각재 중심의 자유수가 제거되는 구간으로 볼 수 있다. 정각재 내부 온도는 60시간의 시점에서 다시 증가하기 시작하며, 이 때 정각재 중심이 섬유포화점 이하의 함수율로 감소한 것으로 생각된다. 과열증기 건조가 진행되는 동안 정각재 중심의 최고 온도는 약 215°C였다. 66시간의 포화-과열증기 연속 건조 공정이 종료된 후, 건조된 낙엽송 각재는 반응기 내에서 약 -15°C/hour의 속도로 서서히 냉각시킴으로써 급격한 온도 변화에 따른 할렬 발생을 방지하였다.

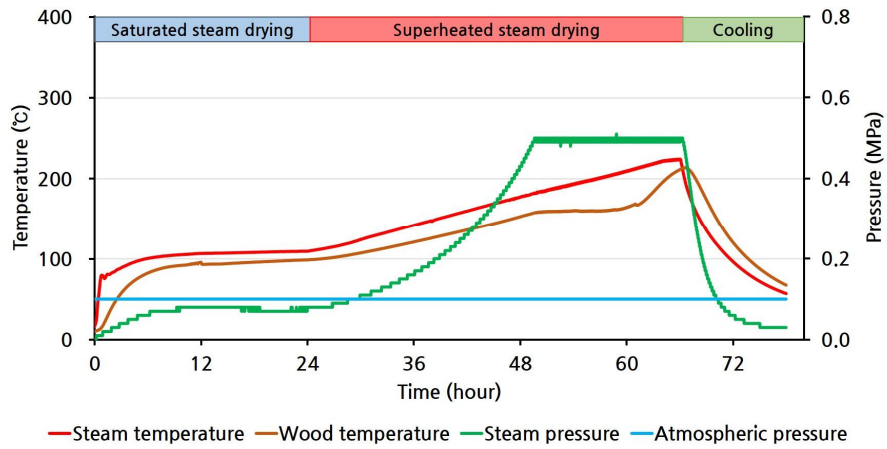


Figure VI-9. Changes of steam temperature, timber temperature, and steam pressure during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.2. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 내부 함수율 분포 변화 및 유변학적 거동 변화 분석

3.2.1. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 함수율 변화

Figure VI-10은 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 중 각재의 평균 함수율 변화를 나타낸 그래프이다. 24시간의 포화증기 건조에 의해 약 8%의 함수율이 감소하여 건조 효과가 미미하였음을 알 수 있다. 42시간의 과열증기 건조에 의해 낙엽송 각재는 약 25%의 함수율이 감소해 거의 전건되었다. 12시간의 냉각이 진행되는 동안 반응기 내부의 과열증기가 응축되면서 전건된 목재가 조습되어 약 2%의 함수율이 증가하였다. 78시간의 포화-과열증기 연속 건조가 끝났을 때, 낙엽송 정각재의 최종 함수율은 약 3%였다.

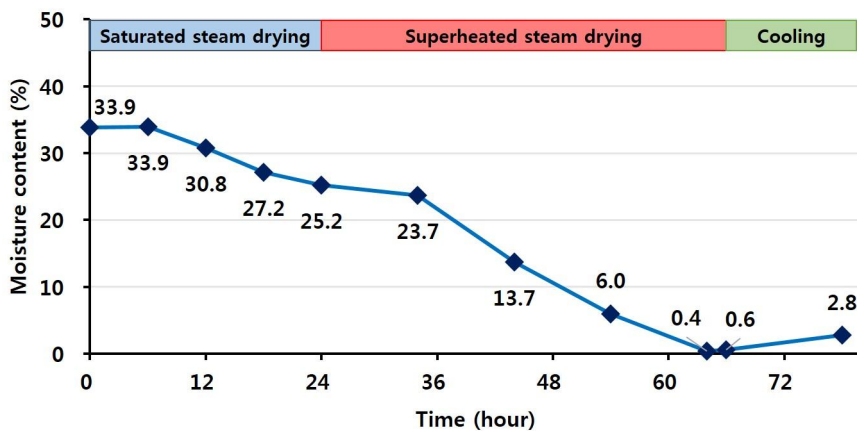


Figure VI-10. Average moisture content changes of the timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.2.2. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 각재 내부 함수율 분포 변화

Figure VI-11은 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 각재 내부 함수율의 횡단방향 분포를 나타낸 그림이다.

포화증기 건조가 진행되는 동안 표면층은 30~35%의 함수율 범위에서 10~20%의 함수율 범위까지 건조가 되었지만 내부층과 중심층은 거의 건조가 되지 않았다. 전체적으로 표면층과 내부층 및 중심층 간의 함수율 차이가 크지 않았음을 알 수 있었다.

과열증기 건조가 진행되는 동안에는 표면층, 내부층, 중심층 순서대로 빠르게 건조가 되기 시작했다. 하지만 표면층은 44시간의 건조 시점에서 10%의 함수율 이하까지 건조된 반면에 내부층은 아직 20% 이상의 함수율을 유지하고 있는 상태였고, 54시간의 건조 시점에서 내부층이 10% 이하로 건조된 반면에 중심층은 18%의 함수율을 나타냈다. 즉, 과열증기 건조가 진행되는 동안에는 표면층과 내부층 및 중심층 간에 함수율 차이가 크게 발생했음을 알 수 있었다. 64시간의 건조 시점에서는 낙엽송 정각재 내부는 전체적으로 거의 전건되었음을 알 수 있었다.

포화-과열증기 연속 건조가 끝나고 반응기 내에서 낙엽송 각재가 냉각되는 동안 반응기 내부 과열증기가 응축되면서 전건된 낙엽송 정각재가 조습되면서 전체적으로 약 3%의 함수율을 갖는 것으로 나타났다.

배경색 구분		0 hour					6 hour					12 hour							
함수율 범위	0 ~ 5	31.10	31.97	32.31	32.51	31.19	28.90	29.63	30.12	29.61	19.46	13.22	22.71	24.34	23.39	17.55			
5 ~ 10	10 ~ 15	32.84	35.73	36.80	35.77	31.44	33.05	38.36	37.16	35.96	22.14	17.73	32.49	32.04	32.03	24.19			
15 ~ 20	20 ~ 25	32.29	37.13	37.37	36.54	32.10	33.85	38.30	38.84	36.73	22.15	19.68	33.90	37.80	37.75	26.98			
25 ~ 30	30 ~ 35	32.27	37.23	39.31	37.72	31.45	33.55	36.40	38.18	36.92	22.43	17.38	37.36	42.78	44.77	28.15			
35 ~ 40	40 ~ 45	31.02	34.09	34.75	32.80	29.22	31.48	34.09	32.64	26.88	17.74	15.49	30.17	33.06	34.66	21.85			
18 hour		24 hour					34 hour					44 hour							
11.47	16.19	16.76	14.37	10.82	9.50	18.71	21.01	20.05	13.18	7.10	13.24	15.37	14.44	9.32	3.06	4.71			
20.74	32.38	30.90	32.32	23.40	11.96	31.19	34.09	33.09	19.92	10.37	29.41	31.22	28.37	14.63	3.86	12.37			
25.42	34.35	32.30	30.90	16.76	11.45	30.17	33.61	32.99	21.02	10.37	37.74	38.03	33.94	16.24	4.02	17.21			
21.26	34.14	34.35	31.40	24.31	12.05	29.94	33.24	35.28	21.72	10.20	34.46	35.20	35.04	19.50	4.35	17.60			
13.55	23.24	25.42	24.30	17.30	10.58	17.22	18.18	18.88	13.78	8.04	15.19	14.17	16.28	12.79	4.36	7.42			
54 hour					64 hour					66 hour					78 hour				
1.67	1.65	1.62	1.73	1.80	0.01	0.01	0.04	0.07	0.08	0.15	0.01	0.10	0.00	0.06	2.67	2.50			
1.85	3.34	6.25	6.30	2.76	0.05	0.00	0.07	0.01	0.35	0.15	0.25	0.16	0.22	0.08	3.16	3.39			
2.60	8.39	18.32	13.41	4.28	0.24	0.32	0.21	0.26	0.53	0.20	0.31	0.30	0.32	0.13	3.35	4.23			
2.68	5.81	10.91	11.19	3.71	0.43	0.70	0.85	0.61	0.71	0.24	0.34	0.37	0.33	0.24	3.56	3.95			
3.14	4.31	4.61	4.20	3.61	0.63	1.02	1.34	1.02	1.12	0.42	0.42	0.43	0.46	0.40	3.91	3.75			

Figure VI-11. Moisture content distribution changes along to the transverse direction in the timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.2.3. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 내부 할렬 발생 유무 평가

Figure VI-12는 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 각재 내부 할렬 발생 유무를 확인하기 위해 각재의 길이방향에서 중앙 부위를 절단한 횡단면 사진이다.

포화증기 건조가 진행되는 동안에는 표면층과 내부층 및 중심층 간에 함수율 차이가 크지 않았기 때문에 내부 할렬은 발생하지 않았다.

반면에 과열증기 건조가 진행되면서 내부층과 중심층 간에 함수율 차이가 크게 발생하면서 내부 할렬이 발생했다. 대부분의 내부 할렬은 수나 미성숙재에서 발생했다. 수나 미성숙재가 포함된 정도와 같이 건조 시편에 따른 편차가 있지만 할렬이 발생하지 않도록 과열증기 건조 조건을 변화시킨다면 0.1 m의 두께와 폭을 갖는 낙엽송 생재 정각재를 할렬 발생 없이 건조할 수 있을 것으로 생각되었다.

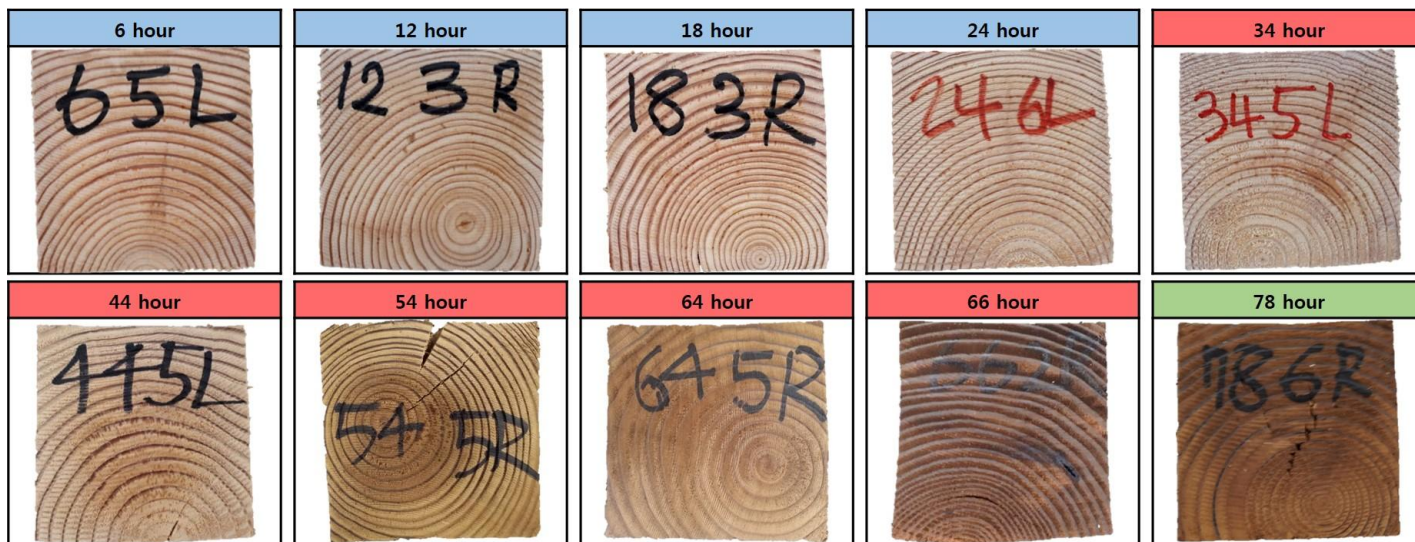


Figure VI-12. Cross section images at center of timber during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.2.4. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 함수율 변화

Figure VI-13은 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 슬라이스 시편의 함수율 변화를 나타낸 그래프이다. 표면층은 건조 공정이 시작됨과 동시에 매우 빠른 속도로 건조되면서 12시간 만에 함수율이 10% 이하가 되었다. 반면에 내층은 포화증기 건조 중에는 약 25%의 함수율을 유지하다가 과열증기 건조가 시작되면서 빠르게 건조되기 시작해 44시간의 시점에서 10%의 함수율까지 건조되었다. 중심층은 44시간의 시점까지도 30%의 함수율을 유지했고, 이후 급격히 건조되면서 64시간의 시점에서 약 3%의 함수율까지 건조되었다. 표면층과 내부층, 내부층과 중심층 사이의 함수율 차이만을 고려한다면 표면 할렬은 12시간에서 36시간 사이에서 발생할 가능성이 높고, 내부 할렬은 44시간에서 54시간 사이에서 발생할 가능성이 높을 것으로 생각된다.

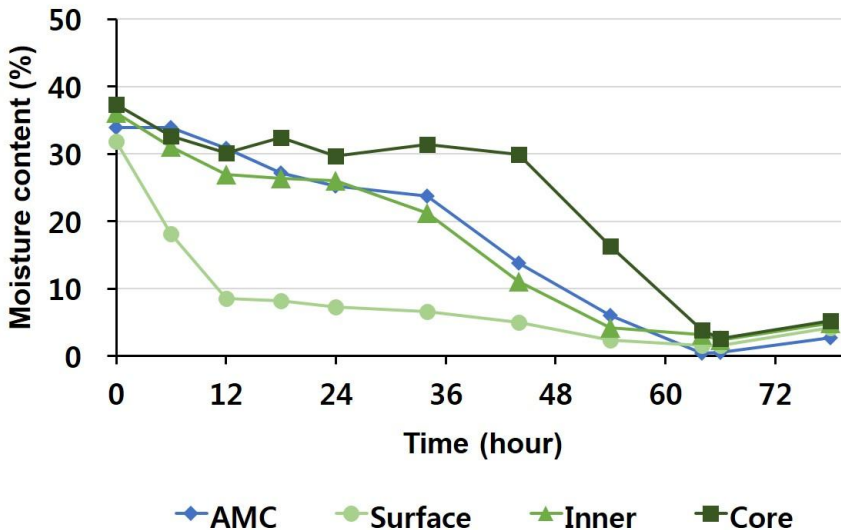


Figure VI-13. Moisture contents changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.2.5. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 자유 수축률 및 수분 감소에 따른 실제 수축률 변화

Figure VI-14와 Figure VI-15는 각각 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 슬라이스 시편의 자유 수축률 변화 및 수분 감소에 따른 실제 수축률 변화를 나타낸 그래프이다. 자유 수축률은 시편의 함수율에 비례한 일차 함수로 계산되었기 때문에 함수율 변화 양상과 유사한 경향을 보인다. 표면층은 건조 시작 후 12시간까지는 급격히 증가하다가 이후 서서히 증가했고, 내부층은 포화증기 건조 중에는 서서히 증가하다가 과열증기 건조 중에는 급격히 증가했다. 중심층은 함수율이 30% 이상을 유지하는 44시간까지는 자유 수축률이 0이었고, 섬유포화점 이하로 건조되기 시작하면서 급격히 증가하기 시작했다.

수분 감소에 따른 실제 수축률은 자유 수축률 변화와 유사한 경향을 보였지만 건조 응력에 의한 수축률의 차이가 발생했다. 포화증기 건조가 진행되는 동안 표면층의 실제 수축률은 자유 수축률보다 작은 값을 나타내다가 내부층이 건조되기 시작하는 44시간 시점부터 자유 수축률과 유사한 값을 나타내었다. 내부층은 공정이 진행되는 동안 전체적으로 자유 수축률과 유사한 값을 나타내었다. 중심층은 30% 이상의 함수율을 갖는 44시간까지 자유 수축률이 0이었지만 실제로는 수축이 되었음을 알 수 있는데 이는 표면층과 내부층에 의한 건조 응력 때문인 것으로 생각된다. 목재의 온도가 200°C를 넘어간 시점인 64~66시간의 시점에서는 표면층, 내부층, 중심층 모두에서 실제 수축률이 자유 수축률보다 크게 나타났고, 냉각이 종료된 시점(78시간)에서는 자유 수축률보다 실제 수축률이 작게 나타났는데 이는 고온의 열처리에 의해 세포벽 구성성분 중 일부가 분해된 영향인 것으로 생각된다.

Table VI-2는 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 자유 수축률과 실제 수축률의 차이를 정리한 표이다. 표의 값이 양(+)의 값이면, 자유 수축률보다 적게 수축되었음을 의미하고, 음(-)의 값이면, 자유 수축률보다 많이 수축되었음을 의미한다. 표면층과 내부층은 포화증기 건조가 진행되는 동안은 양의 값을 보이다가 과열증기 건조가 진행되는 동안은 음의 값을 보였고, 중심층은 공정 전체적으로 음의 값을 나타내었다. 포화증기 건조가 진행되는 동안에는 표면층과 내부층의 수분이 감소함에 따라 수축하고자 하지만 각각 내부층과 중심층에 의해 수축이 억제되면서 자유 수축률이 실제 수축률보다 큰 값을 갖게 되었다. 과열증기 건조가 진행되는 동안에는 고온의 열처리에 의해 수분 감소에 의한 수축과 동시에 세포벽 구성성분의 열분해에 의한 치수 변화가 동반됨에 따라 모든 층에서 자유 수축률보다 큰 수축이 발생한 것으로 생각된다.

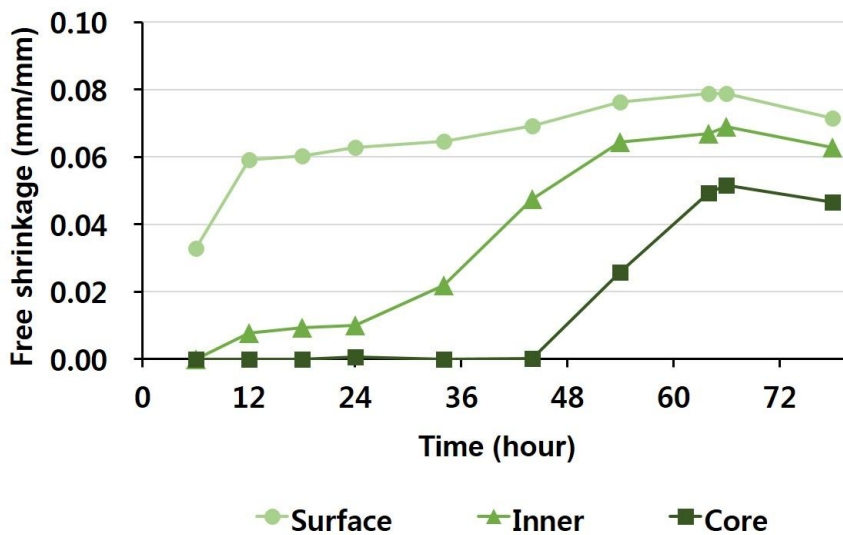


Figure VI-14. Free shrinkage changes during the continuous drying process using saturated and superheated steam

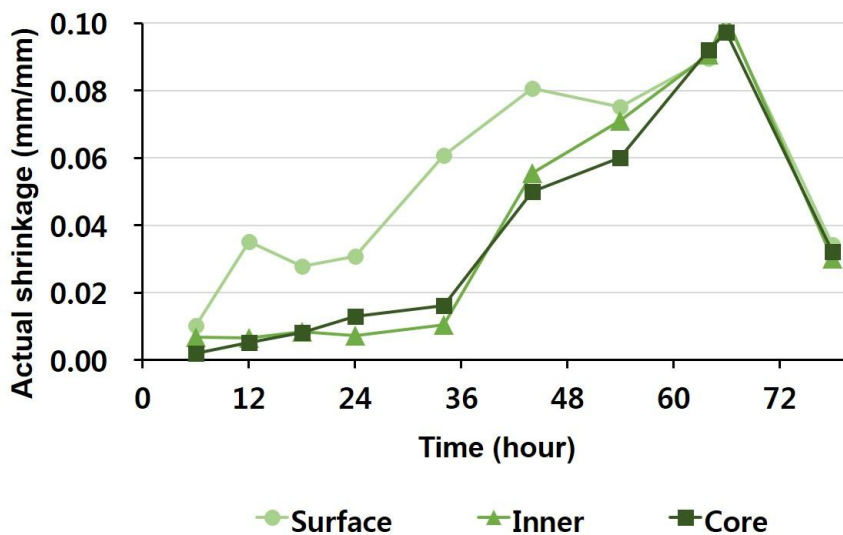


Figure VI-15. Actual shrinkage changes during the continuous drying process using saturated and superheated steam

Table VI-2. Difference between free shrinkage and actual shrinkage

	Surface layer	Inner layer	Core layer
6 hour	0.0228	– 0.0068	– 0.0020
12 hour	0.0240	0.0010	– 0.0053
18 hour	0.0324	0.0007	– 0.0081
24 hour	0.0322	0.0027	– 0.0124
34 hour	0.0039	0.0115	– 0.0160
44 hour	– 0.0115	– 0.0082	– 0.0499
54 hour	0.0012	– 0.0067	– 0.0344
64 hour	– 0.0108	– 0.0239	– 0.0428
66 hour	– 0.0222	– 0.0329	– 0.0459
78 hour	0.0372	0.0326	0.0144

3.2.6. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 탄성 변형률 변화

Figure VI-16은 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 슬라이스 시편의 탄성 변형률 변화를 나타낸 그래프이다. 탄성 변형은 슬라이스 시편 제작 직후, 건조 응력이 해제됨과 동시에 순간적인 길이 변화를 의미하며, 목재 내에서 발생하는 건조 응력과 밀접한 관련이 있다. 포화증기 건조 초기(6시간)에는 표면층이 빠르게 건조되면서 수축된다. 하지만 아직 섬유포화점 이상의 함수율을 유지하는 내부층에 의해 수축이 억제되기 때문에 인장 응력을 받게 된다. 동시에 내부층과 중심층은 표층에서 발생한 수축의 영향으로 압축 응력 상태에 놓이게 된다. 건조가 진행되면서 표면층의 인장 응력과 내부층 및 중심층의 압축 응력은 그 크기가 증가한다. 과열증기 건조가 시작되면서 내부층도 건조가 되기 시작하면 표면층의 인장 응력과 내부층의 압축 응력의 크기는 감소하며, 34시간의 시점에서 표면은 더 이상 수축하지 않고, 내부층의 수축을 억제하기 때문에 내부층은 인장 응력 상태에 놓이게 되고, 표면층은 반대로 압축 응력을 받게 된다. 같은 이유에서 44시간의 시점이 지나면 중심층도 건조되기 시작하면서 내부층이 다시 압축 응력을 받게 되고, 중심층이 인장 응력에 놓이게 된다. 건조된 각재가 반응기 내에서 냉각된 후에는 모든 슬라이스 층이 압축 응력을 받으면서 수축하는 경향을 보였는데 이는 고온의 열처리에 의한 영향으로 생각된다.

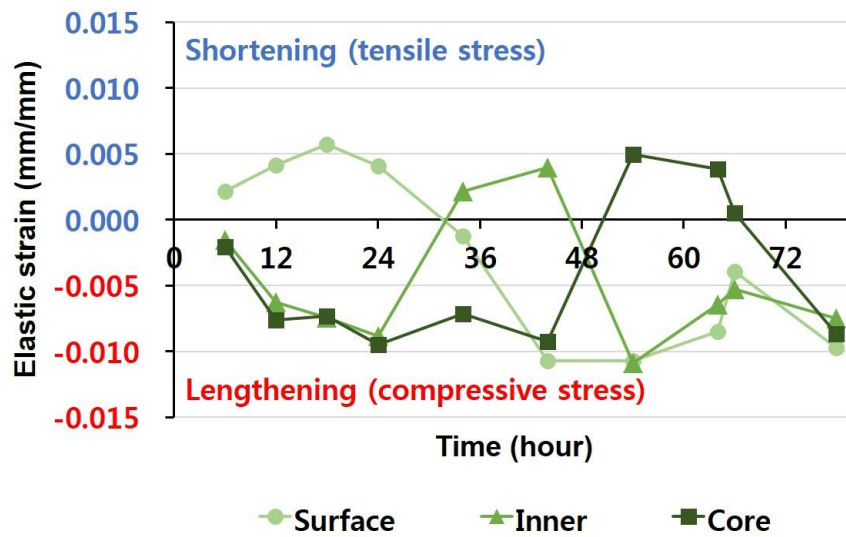


Figure VI-16. Elastic strain changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.2.7. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 점탄성 변형률 변화

Figure VI-17은 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 슬라이스 시편의 점탄성 변형률 변화를 나타낸 그래프이다. 점탄성 변형은 순간적인 탄성 변형 이후에 수분 변화와는 상관없이 시간 경과에 따라 응력이 완화되면서 발생하는 슬라이스 시편의 길이 변화이기 때문에 탄성 변형과 같은 경향을 보이며, 자연 탄성 변형이라고도 한다. 즉, 포화증기 건조 공정 중(6~24시간)에는 표면층이 인장 응력을 받았고, 과열증기 건조 초기(34~44시간)에는 내부층이, 과열증기 건조 말기(54~66시간)에는 중심층이 인장 응력을 받았다. 점탄성 변형은 시간의 경과에 따라 그 값이 다르게 나타난다. Zhan 등(2009)은 2시간에서 12시간의 시간 경과 후에 점탄성 변형률이 탄성 변형률의 1/10의 값을 갖는 것으로 보고한 바 있고, 한(2014)은 48시간의 시간 경과 후에 1/5의 값을 갖는 것으로 보고한 바가 있다. 본 연구에서는 점탄성 변형량의 최대치를 확인하기 위해 응력 완화 시간을 7일(168시간)로 설정하였기 때문에 기존의 연구 결과에 비해 높은 값을 갖게 되었다. 포화증기 건조 중에는 점탄성 변형률이 탄성 변형률과 유사한 값을 보였고, 과열증기 건조 중에는 탄성 변형률보다 약간 큰 값을 보였다. 이는 고온의 열처리에 의한 영향인 것으로 생각된다.

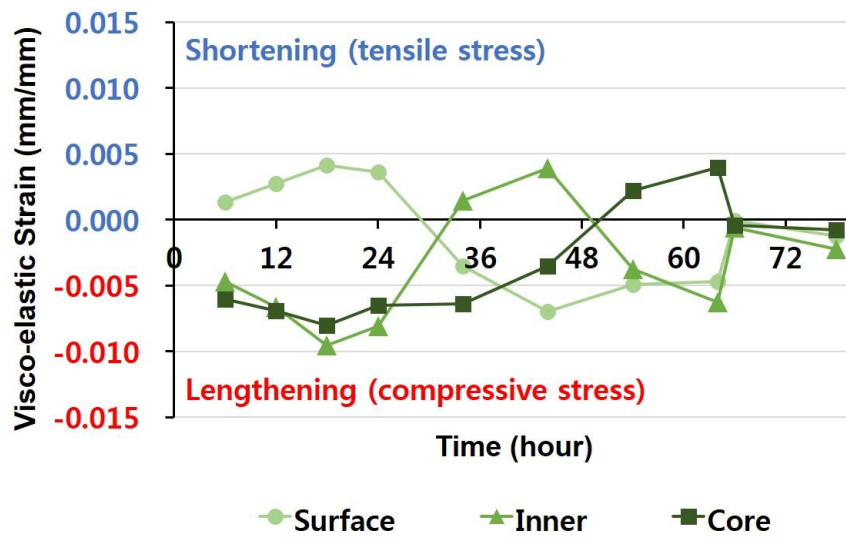


Figure VI-17. Visco-elastic strain changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.2.8. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 점성 변형률 변화

Figure VI-18은 낙엽송 정각재 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 슬라이스 시편의 점성 변형률 변화를 나타낸 그래프이다. 점성 변형은 자유 수축량과 실제 수축량의 차이 중에서 탄성 변형과 점탄성 변형에 의해 회복되지 못하고 영구적으로 남아있는 양으로서, 1 mm 두께 시험편의 자유 수축률을 기준으로 결정된 결과이다. 포화증기 건조 초기에 표면층은 빠르게 건조된다. 하지만 내부층은 건조되지 않고 표면층의 수축을 억제하기 때문에 표면층은 인장 응력을 받게 되고 이로 인해 표면층의 실제 수축률은 자유 수축률보다 작게 나타난다. 표면층에 발생한 인장 응력은 건조가 진행되면서 계속 이어지기 때문에 크리프의 영향을 받으며, 그 영향으로 인해 응력이 이완되어 더 이상 수축하려는 힘을 잃고 억제된 상태로 고정화되는 인장 세트가 형성된다. 인장 세트에 의해 표면층은 응력이 제거되더라도 수축하지 못한다. 즉, 자유 수축량에서 수분 감소에 따른 실제 수축량과 탄성 및 점탄성 변형량을 제한 값으로 계산된 점성 변형량은 양(+)의 값을 갖는다. 내부층과 중심층도 유사한 형태를 보이다가 과열증기 건조가 진행되면서 모든 층의 값들이 작아지면서 음(-)의 값을 갖는 경향을 보였다. 앞서 자유 수축률과 실제 수축률의 차이가 발생하는 원인 및 그 경향성과 같이 고온의 열처리에 의해 세포벽 구성성분이 열분해됨에 따라 실제 수축률이 자유 수축률보다 커지게 되고 따라서 점성 변형률이 음(-)의 값을 갖는 것으로 생각된다.

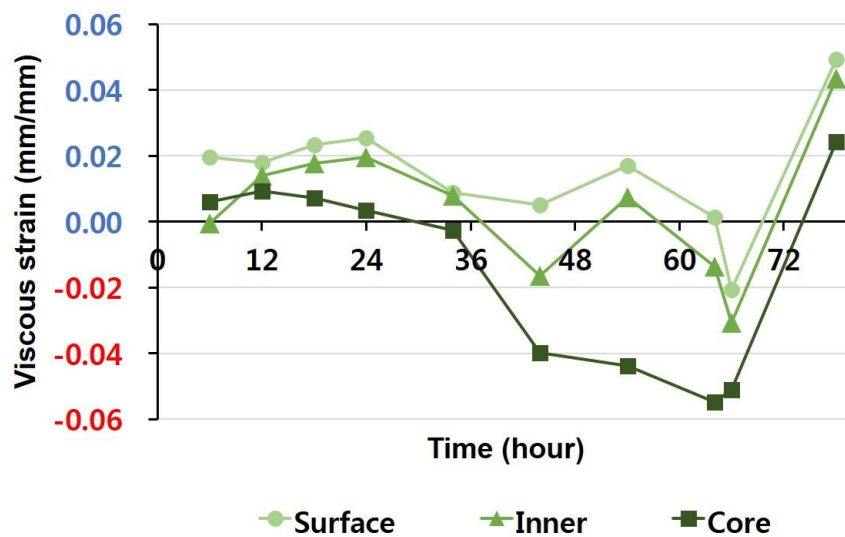


Figure VI-18. Viscous strain changes of slice during the continuous drying process using saturated and superheated steam

3.3. 낙엽송 각재 포화-과열증기 연속 건조 공정 중 건조 응력 산출

건조 중 목재의 건조 응력은 탄성 변형률과 탄성 계수의 곱으로 결정된다. Figure VI-16의 탄성 변형률 결과를 보면 인장 응력은 표면층에서는 18시간 시점에서 최대값을 갖고, 내부층은 44시간의 시점에서, 중심층은 54시간의 시점에서 최대값을 갖는 것을 알 수 있고, 이 중 18시간의 표면층에서 가장 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 하지만 Figure VI-12의 횡단면 사진을 보면 54시간의 시점에서 내부 할렬이 발생했음을 알 수 있다. 따라서 54시간 시점에서 측정된 건조 응력은 할렬 발생에 의해 완화된 건조 응력으로 생각되었다. 따라서 내부층 및 중심층에 대한 건조 응력 분석은 본 연구에서 고려하지 않았다.

낙엽송의 접선 방향 인장 실험을 통해 얻어진 접선 방향 인장 탄성 계수는 304.72 MPa이었다. 이때 실험에 사용된 낙엽송 시편의 함수율은 약 11.74%($\pm 0.20\%$)였다. 목재의 탄성계수는 함수율과 온도에 따라서 변하는 것으로 알려져 있다(강 등, 2008; Zhan *et al.* 2009). 따라서 10°C의 온도 조건에서 측정한 11.74%의 함수율을 갖는 낙엽송의 인장 탄성 계수를 18시간 시점에서 낙엽송 각재의 온도 조건과 함수율 조건으로 보정해야한다. 18시간 시점에서 목재의 온도는 약 100°C였고, 이때 표면층 슬라이스 시편의 함수율은 8.20%였다. Östman(1985)은 10% 함수율을 갖는 Spruce의 탄성 계수는 25°C에서 90°C로 온도가 증가할 때 75% 수준으로 감소한다고 보고한 바 있다. 즉, 18시간의 시점에서 낙엽송 각재 표면층의 접선 방향 인장 탄성 계수는 228.54 MPa로 추정되고, 이때 낙엽송 표면층의 탄성 변형률이 0.0057 mm/mm이므로, 건조 응력은 1.30 MPa이 된다.

목재의 표면 할렬은 표면 건조 응력이 접선 방향 인장 강도를 초과할 때 발생한다. 10°C의 온도 조건에서 측정한 11.74%의 함수율을 갖는 낙엽송의 접선 방향 인장 강도는 6.51 MPa이었다. 목재의 강도 역시

온도와 함수율에 영향을 받는다. 목재의 인장 강도는 다른 강도에 비해 온도의 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있다(Gerhards, 1982). Östman(1985)은 10% 함수율을 갖는 Spruce의 인장 강도는 25°C에서 90°C 온도가 증가할 때 80% 수준으로 감소한다고 보고한 바 있다. 따라서 18시간 시점에서 낙엽송의 접선 방향 인장 강도는 5.21 MPa로 추정된다. 낙엽송 각재의 포화-과열증기 연속 건조 공정이 진행되는 동안 각재 표면의 최대 인장 응력이 낙엽송의 접선방향 인장 강도를 초과하지 않았기 때문에 건조가 진행되는 동안 각재 표면에서는 할렬이 발생하지 않은 것으로 생각된다.

4. 결론

본 장에서는 0.1 MPa, 100℃ 조건의 포화증기와 0.5 MPa, 220℃ 조건의 과열증기를 연속으로 적용하여 낙엽송 각재를 건조하는 동안 각재의 함수율 변화 및 유변학적 거동을 분석하였다.

24시간의 포화증기 건조에 의해 낙엽송 각재는 약 8%의 함수율 감소를 보였고, 각재 표면과 내부의 함수율 차이가 적었다. 이에 따라 표면과 내부에서는 어떠한 할렬도 발생하지 않았다.

42시간의 과열증기 건조에 의해 낙엽송 각재는 약 25%의 함수율이 감소하였다. 하지만 각재 내부에서 함수율 차이가 크게 발생함에 따라 내부에서 할렬이 발생하였다.

각재가 반응기 내에서 12시간 동안 서서히 냉각되면서 반응기 내부의 증기가 응축됨에 따라 각재의 함수율은 약 2% 증가하여 78시간의 포화-과열증기 연속 건조된 낙엽송 각재의 최종 함수율은 약 3%였다.

낙엽송 각재의 표면과 내부층 및 중심층의 슬라이스 시편에 대한 유변학적 거동을 분석한 결과, 포화증기 건조 구간에서는 표면층이, 과열증기 건조 초기에는 내부층이, 과열증기 건조 후기에는 중심층이 각각 인장 응력 상태에 놓였으며, 포화증기 건조가 시작된 후 18시간이 지난 시점의 표면층에서 가장 큰 인장 응력이 발생하였다. 이때, 각재 표면층에 발생한 인장 응력은 1.30 MPa이었고, 같은 조건에서 낙엽송의 접선방향 인장강도는 5.21 MPa이었다. 즉, 낙엽송의 접선방향 인장 강도가 건조 중 각재에서 발생한 인장 응력보다 크기 때문에 표면 할렬이 발생하지 않은 것으로 생각된다. 슬라이스 시편의 함수율 변화를 통해 각재 내부 할렬은 44~54시간을 전후하여 발생했을 것으로 생각되며, 내부 할렬이 발생하지 않도록 하기 위해 과열증기의 온도 및 압력 조건이나 건조 시간을 조절하는 등의 건조 조건을 조절하고 이를 적절히 통제해야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Andersson, S., Serimaa, R., Väänänen, T., Paakkari, T., Jämsä, S., and Viitanieniemi, P., X-ray scattering studies of thermally modified Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.), *Holzforschung* 59(4): 422–427 (2005).
2. Anglès, M.N., Ferrando, F., Farriol, X., and Salvadó, J., Suitability of steam exploded residual softwood for the production of binderless panels. Effect of the pre-treatment severity and lignin addition, *Biomass and Bioenergy* 21(3): 211–224 (2001).
3. Alén, R., Structure and chemical composition of wood, in *Forest Products Chemistry*, Stenius, P. (Ed.), Helsinki, Fapet Oy, pp. 12–57 (2000).
4. Boonstra, M., A two-stage thermal modification of wood, Ph.D. dissertation, Applied Biological Sciences, Henry Poincaré University, Nancy (2008).
5. Boonstra, M.J., Rilsdilk, J.F., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., van Acker, J., and Stevens, M., Microstructural and physical aspects of heat treated wood. Part 1. Softwoods, *Maderas. Ciencia y tecnologia* 8(3): 193–208 (2006A).
6. Boonstra, M.J., Rilsdilk, J.F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., van Acker, J., and Stevens, M., Microstructural and physical aspects of heat treated wood. Part 2. Hardwoods, *Maderas. Ciencia y tecnologia* 8(3): 209–217 (2006B).

7. Boonstra, M.J. and Tjeerdsma, B., Chemical analysis of heat treated softwoods, *Holz als Roh- und Werkstoff* 64(3): 204–211 (2006).
8. Boonstra, M.J., Tjeerdsma, B., and Groeneveld, H.A.C., Thermal modification of non-durable wood species. 1. The Plato technology: Thermal modification of wood, in *International Research Group Wood Pre, Section 4–Processes, 29 Annual Meeting, Maastricht*, p. 13 (1998).
9. Borrega, M., Mechanisms affecting the structure and properties of heat-treated and high-temperature dried Norway spruce (*Picea abies*) wood, Ph.D. dissertation, School of Forest Sciences, University of Eastern Finland, Joensuu (2011).
10. Bourgois, J., Bartholin, M.C., and Guyonnet, R., Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product, *Wood Science and Technology* 23(4): 303–310 (1989).
11. Bourgois, J. and Guyonnet, R., Characterization and analysis of torrefied wood, *Wood Science and Technology* 22(2): 143–155 (1988).
12. Burmester, A., Effect of heat-pressure-treatments of semi-dry wood on its dimensional stability, *Holz als Roh- und Werkstoff* 31(6): 237–243 (1973).

13. Burmester, A., The dimensional stabilization of wood, *Holz als Roh- und Werkstoff* 33(9): 333–335 (1975).
14. Cheng, W., Morooka, T., Liu, Y., and Norimoto, M., Shrinkage stress of wood during drying under superheated steam above 10 °C, *Holzforschung* 58(4): 423–427 (2004).
15. Defo, M., Fortin, Y., and Cloutier, A., Modeling superheated steam vacuum drying of wood, *Drying Technology* 22(10): 2231 – 2253 (2004).
16. Determination of sugars, byproducts, and degradation products in liquid fraction process samples, NREL/TP-510-42623 (2008).
17. Deventer, H.C., and Heijmans, R.M., Drying with superheated steam, *Drying Technology* 19(8): 2033–2045 (2001).
18. Dinwoodie, J.M., *Wood–Nature’s cellular, polymeric fibre–composite*, The Institute of Metal, London (1989).
19. Dirol, D. and Guyonnet, R., Durability by rectification process, in *International Research Group Wood Pre, Section 4 – Processes*, N° IRG/WP 93-40015 (1993).
20. D’Jakov, K. and Konepleva. T., Moisture absorption by Scots Pine wood after heat treatment, *Arhangel’sk* 10(1): 112–114 (1967).

21. Eom, Y.G., Wood anatomy of Korean species, Seoul, Media wood. Ltd., pp. 20–21 (2015).
22. Esteves, B.M., Graça, J., and Pereira, H., Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood, *Holzforschung* 62(3): 344–351 (2008).
23. Esteves, B.M. and Pereira, H.H., Wood modification by heat treatment: A review, *BioResources* 4(1): 370–404 (2009).
24. Fengel, D., On the changes of the wood and its components within the temperature range up to 200°C – Part 1, *Holz als Roh- und Werkstoff* 24: 9–14 (1966a).
25. Fengel, D., On the changes of the wood and its components within the temperature range up to 200°C – Part 2, *Holz als Roh- und Werkstoff* 24: 98–109 (1966b).
26. Fengel, D. and Wegner, G., Chapter 2. Structure and Ultrastructure, in *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, München, Walter de Gruyter, pp. 6–25 (1989).
27. Ferrari, S., Allegretti, O., Cuccui, I., Moretti, N., Marra, M., and Todaro, L., A revaluation of Turkey oak wood (*Quercus cerris* L.) through combined steaming and thermo-vacuum treatments, *BioResources* 8(4): 5051–5066 (2013).

28. Gerhards, C.C., Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects, *Wood and Fiber* 14(1): 4–36 (1982).
29. Giebler, E., Dimensional stabilization of wood by moisture–heat–pressure–treatment, *Holz als Roh– und Werkstoff* 41(3): 87–94 (1983).
30. Hailwood, A.J. and Horrobin, S., Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model, *Transactions of the Faraday Society* 42B: 84–92 (1946).
31. Han, Y., Yang, S.–Y., Park, J.–H., Chang, Y.–S., Eom, C.–H., and Yeo, H., Separation of drying strains and the calculation of drying stress considering the viscoelasticity of red pine wood during drying, *Drying Technology* 35(15): 1858–1866 (2017).
32. Hanhijärvi, A., Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part III. Experimental results under drying conditions (mechano–sorptive creep), *Holz als Roh– und Werkstoff* 58(1–2): 63–71 (2000).
33. Haque, M.N. and Sargent, R., Standard and superheated steam schedule for radiata pine single–board drying: model prediction and actual measurements, *Drying Technology* 26(2): 186–191 (2008).

34. Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., and Kim, N.H., Effect of mechanical restraint on drying defects reduction in heat-treated okan wood, *BioResources* 12(4): 7452–7465 (2017a).
35. Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Febrianto, F., and Kim, N.H., Effect of mechanical restraint on the properties of heat-treated *pinus koraiensis* and *paulownia tomentosa* woods, *BioResources* 12(4): 7539–7551 (2017b).
36. Hidayat, W., Qi, Y., Jang, J.H., Park, B.H., Banuwa, I.S., Febrianto, F., and Kim, N.H., Color change and consumer preferences towards color of heat-treated Korean white pine and royal paulownia woods, *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 45(2): 213–222 (2017c).
37. Hietala, S., Maunu, S.L., Sundholm, F., Jämsä, S., and Viitaniemi, P., Structure of Thermally Modified Wood Studied by Liquid State NMR Measurements, *Holzforschung* 56(5): 522–528 (2002).
38. Hillis, W., High temperature and chemical effects on wood stability. Part 1: General considerations, *Wood Science and Technology* 18(4): 281–293 (1984).

39. Inoue, M., Sekino, N., Morroka, T., Rowell, R.M., and Norimoto, M., Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming, *Journal of Tropical Forest Science* 20(4): 273–281 (2008).
40. Jang, S.-K., Kim, H.-Y., Jeong, H.-S., Kim, J.-Y., Yeo, H., and Choi, I.-G., Effect of ethanol organosolv pretreatment factors on enzymatic digestibility and ethanol organosolv lignin structure from *Liriodendron tulipifera* in specific combined severity factors, *Renewable Energy* 87: 599–606 (2016).
41. Jeong, H.-S., Jang, S.-K., Kim, H.-Y., Yeo, H., Choi, J.W., and Choi, I.-G., Effect of freeze storage on hemicellulose degradation and enzymatic hydrolysis by dilute-acid pretreatment of Mongolian oak, *Fuel* 165: 145–151 (2016).
42. Karnovsky, M.J., A formaldehyde–glutaraldehyde fixative of high osmolality for use in electron microscopy, in *Abstracts of Papers Presented at the Fifth Annual Meeting, The American Society for Cell Biology*, pp. 137A–138A (1965).
43. Kollmann, F., *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Berlin, Springer Verlag (1936).
44. Kollmann, F. and Fengel, D., Changes in the chemical composition of wood by heat treatment, *Holz als Roh- und Werkstoff* 12: 461–468 (1965).

45. Kollmann, F. and Schneider, A., On the sorption behaviour of heat stabilized wood, *Holz als Roh- und Werkstoff* 21(3): 77–85 (1963).
46. Kotilainen, R.A., Toivannen, T.-J., and Alén, R.J., FTIR monitoring of chemical changes in softwood during heating, *Journal of Wood Chemistry and Technology* 20(3): 307–320 (2000).
47. Kim, Y.-H., Lee, S.-M., Lee, H.-W., and Lee, J.-W., Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*), *Bioresource Technology* 116: 120–125 (2012).
48. Ma, Y.-R., Luo, Y.-S., and Li, X.-J., Advances and expectations of study on wood rheology, *Journal of Central South University of Technology* 15(S1): 545–549 (2008).
49. Mårtensson, A., Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations, Ph.D. dissertation, Department of Mechanics and Materials, Lund University, Lund (1992).
50. McMillen, J.M., Drying stresses in red oak, *Forest Products Journal* 5(1): 71–76 (1955).

51. Militz, H., Heat treatment technologies in Europe: Scientific background and technological state-of-art, in Proceedings of Conference on Enhancing the durability of lumber and engineered wood products, Madison, Forest Products Society, pp. 11–13 (2002).
52. Moutee, M., Fortin, Y., and Fafard, M., A global rheological model of wood cantilever as applied to wood drying, *Wood Science and Technology* 41(3): 209–234 (2007).
53. Mujumdar, A.S., Superheated steam drying, in *Handbook of Industrial Drying*, Mujumdar, A.S.(Ed.), New York, USA, CRC Press, pp. 421–432 (1995).
54. Nikolov, S. and Enceev, E., Effect of heat treatment on the sorption dynamics of Beech wood, *Nauc. Trud. Lesotec.* 14(3): 71–77 (1967).
55. Niemz, P., *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen (1993).
56. Noack, D., Über die heisswasserbehandlung von rotbuchenholz im temperaturbereich von 100 bis 180°C, *Holzverwert* 21(5): 118–124 (1969).

57. Nuopponen, M., Vuorinen, T., Jämsä, S., and Viitaniemi, P., The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods, *Wood Science and Technology* 37: 109–115 (2003).
58. Nuopponen, M., Wikberg, H., Vuorinen, T., Maunu, S.L., Jämsä, S. and Viitaniemi, P., Heat-treated softwood exposed to weathering, *Journal of Applied Polymer Science* 91(4): 2128–2134 (2004).
59. Östman, B.A.-L., Wood tensile strength at temperatures and moisture contents simulating fire conditions, *Wood Science and Technology* 19(2): 103–116 (1985)
60. Pang, S., Some consideration in simulation of superheated steam drying of softwood lumber, *Drying Technology* 15(2): 651–670 (1997).
61. Pang, S., Modeling of stress development during drying and relief during streaming in *Pinus radiata* lumber, *Drying Technology* 18(8): 1677–1696 (2000).
62. Pang, S. and Dakin, M., Drying rate and temperature profile for superheated steam vacuum drying and moist air drying of softwood lumber, *Drying Technology* 17(6): 1135–1147 (1999).

63. Pang, S. and Pearson, H., Experimental investigation and practical application of superheated steam drying technology for softwood timber, *Drying Technology* 22(9): 2079–2094 (2004).
64. Park, Y., Eom, C.-D., Han, Y., Park, J.-H., Chang, Y.-S., Yang, S.-Y., Choi, J.-W., and Yeo, H., Combined treatment of green pitch pine wood by heat and superheated steam and the effects on physical properties of the products, *Holzforschung* 68(3): 327–335 (2014).
65. Park, Y., Han, Y., Park, J.-H., Chang, Y.-S., Yang, S.-Y., Chung, H., and Yeo, H., Evaluation of the energy efficiency of combined drying and heat treatment by superheated steam, *Drying Technology* 35(12): 1460–1467 (2017).
66. Park, Y. and Yeo, H., Improvement of heat treatment energy efficiency and control of drying check occurrence using superheated steam, in *International conference on biobase material science and engineering*, Changsha, IEEE, pp. 306–310 (2012).
67. Pelaez-Samabiego, M.R., Yadama, V., Garcia-Perez, M., Lowell, E., and McDonald, A.G., Effect of temperature during wood torrefaction on the formation of lignin liquid intermediates, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 109: 222–233 (2014).

68. Perré, P., Fundamentals of Wood Drying: Cost, Nancy, France, A.R.B.O.L.O.R, p. 366 (2007).
69. Rafsanjani, A., Stiefel, M., Jefimovs, K., Mokso, R., Derome, D., and Catmeliet, J., Hygroscopic swelling and shrinkage of latewood cell wall micropillars reveal ultrastructural anisotropy, *Journal of the Royal Society Interface* 11(95): 20140126 (2014).
70. Rusche, H., Thermal degradation of wood at temperatures up to 200°C – Part 1: Strength properties of dried wood after heat treatment, *Holz als Roh- und Werkstoff* 31:273–281 (1973a).
71. Rusche, H., Thermal degradation of wood at temperatures up to 200°C – Part 2: Reaction kinetics of loss of mass during heat treatment of wood, *Holz als Roh- und Werkstoff* 31:307–312 (1973b).
72. Seborg, R.M., Millet, M.A., and Stamm, A.J., Heat-stabilized compressed wood (Staypack), Madison, USA, Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, (1956).
73. Seborg, R.M., Tarkow, H. and Stamm, A.J., Effect of heat upon the dimensional stabilisation of wood, *Journal of Forest Product Resources Society* 3(9): 59–67 (1953).

74. Simpson, W.T., Dry kiln operator's manual, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, USA, p. 274 (1991).
75. Sivonen, H., Maunu, S.L., Sundholm, F., Jämsä, S., and Viitaniemi, P., Magnetic resonance studies of thermally modified wood, *Holzforschung* 56(6): 648–654 (2002).
76. Sjöström, E., Wood Chemistry – Fundamentals and Applications, San Diego, Academic Press, Inc. (1981).
77. Stamm, A.J., Burr, H.K., and Kline, A.A., Staybwood... heat-stabilized wood, *Industrial Engineering Chemistry* 38(6): 630–634 (1946).
78. Stamm, A.J. and Hansen L.A., Minimizing wood shrinkage and swelling: effect of heating in various gases, *Industrial Engineering Chemistry* 29(7): 831–833 (1937).
79. Svensson, S., and Toratti, T., Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity, *Wood Science and Technology* 36(2): 145–156 (2002).
80. Tarmian, A., Sepegh, A., and Rahimi, S., Drying stress and strain in tension wood: A conventional kiln schedule to efficiently dry mixed tension/normal wood boards in poplar, *Drying Technology* 27(10): 1033–1040 (2009).

81. Tiemann, H.D., Ch. 11 Effect of Different Methods of Drying on the Strength and Hygroscopicity of Wood, in The kiln drying of lumber (3rd Ed.), Philadelphia, USA, J.P. Lippincott Co., pp 256–264 (1920).
82. Tjeerdsma, B.F., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P., and Militz, H., Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement, Holz als Roh- und Werkstoff 56: 149–153 (1998).
83. Tjeerdsma, B.F. and Militz, H., Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood, Holz als Roh- und Werkstoff 63(2): 102–111 (2005).
84. Ugolev, B.N. and Skuratove, N.V., Stress-strain state of wood at kiln drying, Wood Science and Technology 26(3): 209–217 (1992).
85. Viitaniemi, P., Jämsä, S., and Viitaniemi, H., Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products, U.S. Patent N° 5678324 (1997).
86. Wang, Z., Yang, X., Sun, B., Chai, Y., Liu, J., Cao, J., Effect of vacuum heat treatment on the chemical composition of larch wood, BioResources 11(3): 5743–5750 (2016).

87. Weiland, J.J. and Guyonnet, R., Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy, *Holz als Roh- und Werkstoff* 61: 216–220 (2003).
88. Wikberg, H. and Maunu, S.L., Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR, *Carbohydrate Polymers* 58(4): 461–466 (2004).
89. Windeisen, E., Strobel, C., and Wegener, G., Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood, *Wood Science and Technology* 41(6): 523–536 (2007).
90. Won, K.-R., Hong, N.-E., Park, H.-M., Moon, S.-O., and Byeon, H.-S., Effects of heating temperature and time on the mechanical properties of heat-treated woods, *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 43(2): 168–176 (2015).
91. Yang, Y., Zhan, T.Y., Lu, J.X., and Jiang, J.H., Influence of thermo-vacuum treatment on colors and chemical compositions of alder birch wood, *BioResources* 10(4): 7936–7945 (2015).
92. Yao, C., Yongming, F., Jianmin, G., and Houkun, L., Coloring characteristics of in situ lignin during heat treatment, *Wood Science and Technology* 46(1): 33–40 (2012).

93. Yildiz, S., Gezer, E.D., and Yildiz, U.C., Mechanical and chemical behaviour of spruce wood modified by heat, *Building and Environment* 41(12): 1762–1766 (2006).
94. Zhan, J.-F., Gu, J.,-Y., and Shi, S.Q., Rheological behavior of larch timber during conventional drying, *Drying Technology* 27(10): 1041–1050 (2009).
95. Zhuang, J., Wang, X., Xu, J., Wang, Z., and Qin, M., Formation and deposition of pseudo-lignin on liquid-hot-water-treated wood during cooling process, *Wood Science and Technology* 51(1): 165–174 (2017).
96. 강춘원, 김남훈, 김병로, 김영숙, 변희섭, 소원택, 여환명, 오승원, 이원희, 이화형, *신고 목재 물리 및 역학*, 서울, 대한민국, 향문사 (2008).
97. 김광모, 박정환, 박병수, 손동원, 박주생, 김운섭, 김병남, 심상로, *삼나무 열처리재의 물리 및 역학적 특성*, 목재공학 37(4): 330–339 (2009).
98. 김광모, 박정환, 박병수, 손동원, 박주생, 김운섭, 김병남, 심상로, *백합나무 열처리재의 물리 및 역학적 특성*, 목재공학 38(1): 17–26 (2010).
99. 김상용, *전정판 고분자물리학*, 서울, 대한민국, 서울대학교 출판부 (2001).

100. 김수원, 강호양, 열처리 및 증기처리 라디에타 파인 유형목의 잔류 수지율 및 재색변화, 목재공학 33(4): 30-37 (2005).
101. 노승탁, 최신 공업열역학 제4판, 서울, 대한민국, 문운당, pp. 648-656 (2008).
102. 목재의 인장 시험 방법, KS F 2207, 2004.
103. 박용건, 과열증기 목재열처리 조건과 물성에 관한 연구, 석사학위논문, 산림과학부, 서울대학교, 서울 (2012).
104. 박용건, 박준호, 양상윤, 정현우, 김현빈, 한연중, 장윤성, 김경중, 여환명, 과열증기 열처리 낙엽송재의 물리·역학적 성능 및 내후성 평가, 목재공학 44(5): 776-784 (2016).
105. 박용건, 엄창득, 박준호, 장윤성, 김광모, 강춘원, 여환명, 과열증기 열처리 잣나무재의 물성 평가, 목재공학 40(4): 257-267 (2012).
106. 박용건, 장윤성, 양상윤, 여환명, 이미림, 엄창득, 권오경, 평판형 스캐너를 이용한 목재 수축률 측정, 목재공학 43(1): 43-51 (2015A).
107. 박용건, 한연중, 박준호, 장윤성, 양상윤, 정현우, 김경중, 여환명, 고온 열기 처리에 의한 낙엽송재의 물리·역학적 성능 및 내부후성능 변화 고찰, 목재공학 43(3): 334-343 (2015B).
108. 산림청, 목재산업 진흥 종합계획 (2012~2016), 대전, 대한민국, 웃고문화사, p. 18 (2011).

109. 윤경진, 엄창득, 박준호, 김호용, 최인규, 이전제, 여환명, 열처리에 의한 백합나무 재색 제어와 내부후성 제고, 목재공학 37(6): 487-496 (2009).
110. 이원희, 임호묵, 강호양, 180℃와 200℃ 오일열처리 잣나무재의 재색변화, 목재공학 43(4): 438-445 (2015).
111. 임호묵, 홍승현, 강호양, 열처리 잣나무 정각재의 재색 변화 및 물성 조사, 목재공학 42(1): 13-19 (2014).
112. 정희석, 목재와 인류생활, 서울, 서울대학교 출판부 (2004).
113. 정희석, 강호양, 박정환, 이남호, 이형우, 강춘원, 여환명, 새로 쓴 목재 건조학, 서울, 대한민국, 서울대학교출판부 (2008).
114. 한연중, 소나무 목재 내 물질전달 및 건조응력의 비정상상태 분석, 박사학위논문, 산림과학부, 서울대학교, 서울 (2014).

Abstract

Optimization of the Combined Drying and Heat-treatment Process for Wood using Superheated Steam

Yonggun Park

Program in Environment Materials Science

Department of Forest Sciences

The graduate School

Seoul National University

Wood heat treatment is a method of heating to temperatures of 160 ~ 260°C, which induces changes in the chemical composition of wood by thermal hydrolysis to improve the physico-mechanical properties and decay resistance of the wood. The heat-treated wood has some advantages such as the improved dimensional stability with an increase in hydrophobicity, equalization of surface color, and increase in decay resistance. Because of these advantages, various heat treatment methods have been developed mainly in Europe, and the properties of heat-treated wood using each method have been investigated.

In most developed heat treatment methods, the wood which had been dried to approximately 10% of moisture content was used to minimize the check occurrence of the wood during the heat treatment. However, because drying and heat treatment are different

processes in different devices, there is a disadvantage that additional time and energy are required to heat the wood and apparatus.

In this study, superheated steam is used to heat-treat green larch wood without the occurrence of checks. Superheated steam is steam with a higher temperature than the boiling point and a heat transfer medium to dry food, sewage sludge and wood.

By drying and heat-treating green larch lumbers in the superheated steam of various temperature and pressure conditions, the optima condition that the surface or internal checks do not occur is determined. In addition, the control factors of the combined drying and heat treatment process using superheated steam, such as the amount of water to be supplied for the combined process and the method of cooling the heated wood after the combined process, were determined.

Compared with other wood heat treatment methods, the combined drying and heat treatment process using superheated steam has higher energy efficiency. For a quantitative comparison, the amount of energy that is actually consumed in the conventional heat treatment process and the energy efficiency were compared and evaluated. The required heat energy to heat-treat wood is classified into the heat energy (H_1) required to increase the temperature of the wood substance, heat energy (H_2) required to overcome the absorptive power of bound water, heat energy (H_3) required to heat the residual water in the wood, heat energy (H_4) required to heat and evaporate the water that is eliminated from wood, heat energy (H_{5ha}) required to heat the air in the reactor in the hot-air heat treatment or kiln drying, heat energy (H_{5ss}) required to

produce the superheated steam in the combined drying and heat treatment process using superheated steam, and heat energy required to heat the dry air (H_{da}) and water vapor (H_{wv}) that flow in from outside the reactor. The sum (H) of the theoretical required heat energies required to heat-treat wood using each wood heat treatment method was evaluated. The energy loss was determined by the difference between the sum of the theoretical required heat energies and the amount of electricity (P) that is actually consumed to dry and heat-treat wood. As a result, the consumed amount of electricity in the combined drying and heat treatment process using superheated steam was approximately 94,000 kJ less than that in the conventional heat treatment process, and the energy efficiency (80%) of the combined drying and heat treatment process using superheated steam was almost two times of that (49%) of the conventional heat treatment process.

In addition, the relative percentage contents of the chemical major components (cellulose, hemicellulose, lignin and extract) of the larch wood that was dried and heat-treated using superheated steam were measured. The contents of xylan, mannan, galactan and arabinan in hemicellulose significantly decreased, and the content of Klason lignin increased because of the heat treatment. However, the absolute amount of lignin in wood did not increase because of the heat treatment at high temperature, but the furan compounds decomposed from hemicellulose were combined with lignin, which increased the content of Klason lignin measured by Klason lignin method. In the combined drying and heat treatment process using superheated steam, various compounds that were decomposed from

the wood by the high-temperature heat treatment were recovered through the condenser. The recovered compounds from the condenser contained various products that were decomposed from hemicellulose, such as furfural, acetic acid, formic acid, 5-hydroxymethylfurfural, and levulinic acid; sugar components such as glucan, xylan, mannan, galactan and arabinan were also included. It was confirmed that hemicellulose was decomposed by the heat treatment.

The changes of the cell wall structure of larch wood by the combined drying and heat treatment process using superheated steam were evaluated using an optical microscope, a scanning electron microscope and a transmission electron microscope. The optical microscope confirmed that the fine check along the ray cell at the cross section occurred because of the combined drying and heat treatment process using superheated steam. The scanning electron microscopy confirmed that the S2 layer in the secondary wall was roughly cut at the cross section of the wood that was dried and heat-treated using superheated steam, which was also observed at the section of ray cell in the tangential section. In addition, some cracks were observed at the interface between each layer that constituted the cell wall. At the radial section, the pits were aspirated, and the torus was cracked because of the increase in pressure inside the pit because of the combined drying and heat treatment using superheated steam. The transmission electron microscopy showed the discontinuity such as warp or crack of the interface among the intermediate layer, primary wall and secondary wall and the damage of the S3 layer in the secondary layer

because of the combined drying and heat treatment process using superheated steam.

Based on the results of this study, to dry green larch square timber without drying checks, a continuous drying process with pre-drying using saturated steam was applied while maintaining a small internal moisture gradient in the square timber; then, the drying using superheated steam was applied. To develop the drying schedule without drying checks, the drying stress generated inside the wood was quantitatively measured during the continuous drying process using saturated and superheated steam. During the saturated steam drying, although there is a water content difference between the surface of the wood and the inner layer, any surface check did not occur. At this time, tensile stress was applied on the surface layer, and compressive stress was applied on the inner and the core layer. In the early stage of superheated steam drying, internal checks occurred because of the water content difference between the inner and the core layer. At this time, a tensile stress was applied on the inner layer, and a compressive stress was applied on the surface and core layer. At the end of the superheated steam drying, almost all layers were almost completely dried, only the center layer was subjected to the tensile stress, and the surface layer and inner layers were subjected to the compressive stress. In the continuous drying process using saturated and superheated steam, the maximum tensile stress of the surface layer was calculated to 1.30 MPa and the tangential tensile strength of larch wood was estimated to 5.21 MPa under the identical conditions. Since the maximum tensile stress of the surface layer did not

exceed the tangential tensile strength during the drying process, the drying check did not occur on the surface of the larch square timber. It was considered that the internal check occurred at approximately 44 ~ 54 hours. It is necessary to determine and control the proper conditions of superheated-steam drying such as the temperature or pressure of the superheated steam and drying time to prevent internal check.

Keywords : Drying and heat treatment using superheated steam;
Energy efficiency; Major chemical component of wood;
Wood cell wall structure; Drying stress

Student number : 2012-30993